

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Simulace proudění vody v článku kotle

Simulation of WaterFlow in the Boiler Segment

Student: Bc. Václav Slavík
Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Lumír Hružík

Ostrava 2013

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Václav Slavík**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení

Téma: **Simulace proudění vody v článku kotle**
Simulation of Water Flow in the Boiler Segment

Zásady pro vypracování:

Simulujte proudění vody v článku kotle.

1. Popište matematický model proudění vody s přestupem tepla.
2. Zpracujte 3D model článku kotle s uvažováním přestupu tepla dle zadanych parametrů (geometrie, okrajové podmínky, materiál článku).
3. Simulujte proudění vody s přestupem tepla v článku kotle. Vyhodnoťte rychlostní a teplotní pole.
4. Navrhněte vhodné uspořádání geometrie (přepážek) článku s ohledem na rychlostní a teplotní pole při proudění vody.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění - Fluent, CFX*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008, 142 s.,
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>.

KOZUBKOVÁ, M., BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, 173 s., ISBN 978-80-248-2491-8.

INCROPERA, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. edition. John Wiley and Sons, 2007, 996 p. ISBN 978-0-471-45728-2.

ANSYS, Inc. *Fluent 13.0 - ANSYS FLUENT Theory Guide*. 2010.

BOJKO, M. *3D proudění - ANSYS FLUENT*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012, 314 s.,
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/3D-Bojko.pdf>> ISBN 978-80-248-2607-3.

MAMICA, M. *Modelování proudění v článku kotle*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, 59 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr.Ing. Lumír Hružík**

Konzultant diplomové práce: Ing. Adam Bureček

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5. 2013

..... 

Prohlášení

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena na Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávnění užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě ... 20.5. 2013


.....

podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta: 1.máje 1266
735 14 Orlová

Anotace diplomové práce

Slavík, V. Simulace proudění vody v článku kotle.

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013, 62s. Diplomové práce, vedoucí doc. Dr. Ing. Lumír Hružík.

Diplomová práce se zabývá simulací proudění vody v článku kotle s přestupem tepla. Na úvod jsou popsány základní matematické modely proudění, přestupu tepla stěnou a vlastnosti materiálu, ze kterého je článek kotle vyroben. Další kapitola upřesňuje nastavení softwaru ANSYS FLUENT a následné výpočty. Při vypracování je využit model $k-\varepsilon$ a je zde počítáno s konstantními hodnotami měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti na povrchu článku a s těmito veličinami měnícími se v závislosti na teplotě.

Annotation of thesis

Slavík, V. Simulation of Water Flow in the Boiler

Cell Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2013, 62s. Thesis, head: Dr. Ing. Lumír Hružík.

This thesis deals with the simulation of water flow in Article boilers with heat transfer. At home we describe the basic mathematical models of flow, heat transfer wall and the properties of the material from which the article boilers manufactured. The next chapter explains setting software ANSYS FLUENT and subsequent calculations. In developing the model used $k-\varepsilon$ and there is calculated with constant values of specific heat capacity and thermal conductivity on the cell surface as these quantities varying depending on the temperature.

OBSAH

1. Úvod	11
2. Popis matematického modelu proudění vody s přestupem tepla	13
2.1 Proudění skutečné (vazké) tekutiny	13
2.2 Dělení tekutiny podle kinematických hledisek	14
2.2.1 Dělení proudění dle uspořádání v prostoru	15
2.2.2 Dělení proudění podle závislosti na čase	15
2.3 Přestup tepla	15
2.4 Popište matematický model proudění vody s přestupem tepla	18
2.4.1 Základní rovnice proudění	18
2.4.2 Zákon zachování hybnosti	18
2.4.3 Zákon o zachování hmotnosti	19
2.4.4 Zákon zachování energie	21
2.5 Turbulentní proudění kapalin	21
2.5.1 Vlastnosti turbulentního proudění	23
2.5.2 Matematické modely turbulentního proudění	24
2.5.3 Statistické modely turbulence	25
2.5.4 Dvourovnicové modely turbulence	26
3. 3D model článku kotle s uvažováním přestupu tepla	27
3.1 Materiál článku	27
3.2 Geometrie článku a výpočtová síť	30
3.3 Okrajové podmínky	30
3.4 Zadané vstupní a výstupní hodnoty článku kotle	31
4. Simulace proudění vody s přestupem tepla článkem kotle	33
4.1 Vytvoření vnitřního objemu	34
4.2 Vytvoření sítě (MESH)	37

4.3 Okrajové podmínky	39
4.4 Nastavení aplikace FLUENT	41
4.4.1 Nastavení záložky General	42
4.4.2 Nastavení záložky Models	42
4.4.3 Nastavení záložky Materials	44
4.4.4 Nastavení záložky Cell Zone Conditions	45
4.4.5 Nastavení záložky Boundary Conditions	46
4.4.6 Nastavení záložky Solution Controls	48
4.4.7 Nastavení záložky Solution Initialization	49
4.4.8 Nastavení záložky Run calculation	49
5. Vyhodnocení výsledků	51
5.1 Grafické výsledky pro objemový průtok $Q_V = 5 \text{ [dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$	51
5.2 Objemové průtoky $Q_V = 2,5$ a $Q_V = 10 \text{ [dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$	55
5.2.3 Výsledky pro objemový průtok $Q_V = 2,5 \text{ [dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$	55
5.2.1 Výsledky pro objemový průtok $Q_V = 10 \text{ [dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$	56
6. Závěr	57

Seznam použitých značek a symbolů

v	rychlost	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
t	čas	$[\text{s}]$
A	plocha	$[\text{m}^2]$
ϑ	množství tepla	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$
c	měrná tepelná kapacita	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
c_p	měrná tepelná kapacita za konst. tlaku	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
Q	teplo	$[\text{J}]$
λ	součinitel tepelné vodivosti	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
t_t	teplota okolí	$[^{\circ}\text{C}]$
t_s	teplota na stěně	$[^{\circ}\text{C}]$
\dot{q}	tepelný tok	$[\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$
F	síla	$[\text{N}]$
a	zrychlení	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
m	hmotnost	$[\text{kg}]$
F_s	setrvačná síla	$[\text{N}]$
F_m	hmotnostní síla	$[\text{N}]$
F_p	tlaková síla	$[\text{N}]$
F_t	smyková síla	$[\text{N}]$
ρ	hustota	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
μ	dynamická viskozita	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
ε	rychlost disipace	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}]$
x	kartézská souřadnice	$[\text{m}]$
y	kartézská souřadnice	$[\text{m}]$
z	kartézská souřadnice	$[\text{m}]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[1]$
Q_v	objemový průtok	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$
Q_m	hmotnostní průtok	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$
p	tlak	$[\text{Pa}]$

π	Ludolfovo číslo	[1]
τ	smykové napětí	[Pa]
σ	normálové napětí	[Pa]
s	tloušťka stěny	[m]
S	plocha	[m ²]
ν_t	turbulentní viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ν	kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ω	specifická rychlost disipace	[s ⁻¹]
C_μ	konstanta	[1]
$\tau_{i,j}$	tensor Reynoldsových napětí	[Pa]
τ_t	turbulentní napětí	[Pa]

1. Úvod

V diplomové práci se zabývám modelováním proudění vody v článku kotle, kde je nutno zahrnout prostup tepla stěnou článku. Geometrie článku byla poskytnuta zadavatelem. Tato geometrie je upravena v CAD systému z důvodu vytvoření kvalitnější sítě. Jedná se o 3D projekt.

Hlavním výstupem této práce je porovnání rychlosti proudění, rozložení teploty vody a stanovení výstupní teploty vody z článku kotle. Daný článek obsahuje velké množství přepážek a segmentů, které mají parametry rychlostního a teplotního pole rozprostřít co nejefektivněji po celém objemu.

V daném článku kotle probíhá ohřev vody, který slouží k vytápění daného objektu. Z toho důvodu by bylo optimální, aby článek byl uzpůsoben tak, že se bude voda ohřívat rovnoměrně v celém objemu. Tudíž bude obsahovat co nejvíce výhřevných ploch. Tyto plochy by nám měly zajistit dosažení lepších parametrů stejně jako správné rozložení přepážek. Přepážky zde slouží především k úpravě proudění vody. Hlavní požadavek je, aby voda proudila celým objemem tohoto článku. Tyto parametry zjišťujeme experimentálně, nebo použitím CFD systému. Použití CFD systému je výhodnější, z důvodu úspory času na rozdíl od experimentálního měření, které je časově náročnější.

V dnešní době se metoda CFD systému používá velmi často téměř ve všech průmyslových odvětvích. Z těchto odvětví můžu jmenovat například strojírenský, stavební, chemický nebo elektrotechnický průmysl, ale najde své uplatnění i v dalších odvětvích. Existují různé druhy těchto softwarů, mezi nejznámější patří: CFX, Fluent, Star-CD a další. Během vypracování zadané diplomové práce využiji CFD software Fluent.

CFD software Fluent spadající pod Ansys je jeden z nejrozšířenějších softwarů nejen u nás, ale i v zahraničí.

Cíl práce

Cílem diplomové práce je 3D simulace proudění vody s přestupem tepla daného článku kotle. Z vyhodnoceného rychlostního a teplotního pole bude posouzena správnost rozvržení geometrie článku.

2. Popis matematického modelu proudění vody s přestupem tepla

Základní problém proudění vody s přestupem tepla

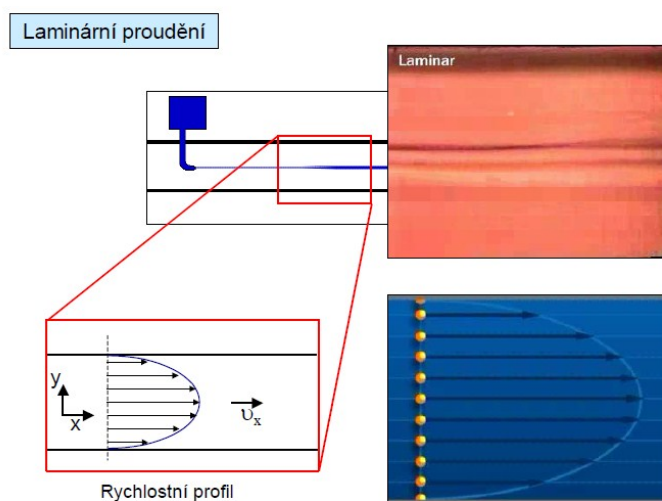
Jedná se o stacionární prostorové (3D)proudění, kde se neuvažuje vliv času. Toto proudění se řeší pomocí elementárních objemů, pro které se sestavují matematické modely. Pro tyto modely se sestavují tzv. rovnice rovnováhy. Řešení těchto rovnic se dosáhne využitím integrací základních diferenciálních rovnic, kde se použijí počáteční a okrajové podmínky ze kterých se získává požadované řešení. K určování rovnováhy se používají zákony z mechaniky. Takto vytvořený matematický model se může řešit numerickou, nebo exaktní metodou.[1]

2.1 Proudění skutečné (vazké) tekutiny

Jedná se o proudění kapaliny, při kterém je uvažováno vnitřní tření kapaliny. Tato kapalina je obecně stlačitelná, ale tuto stlačitelnost je možné v určitých aplikacích zanedbat. U vazkých kapalin se rozlišuje laminární a turbulentní proudění.

Laminární proudění

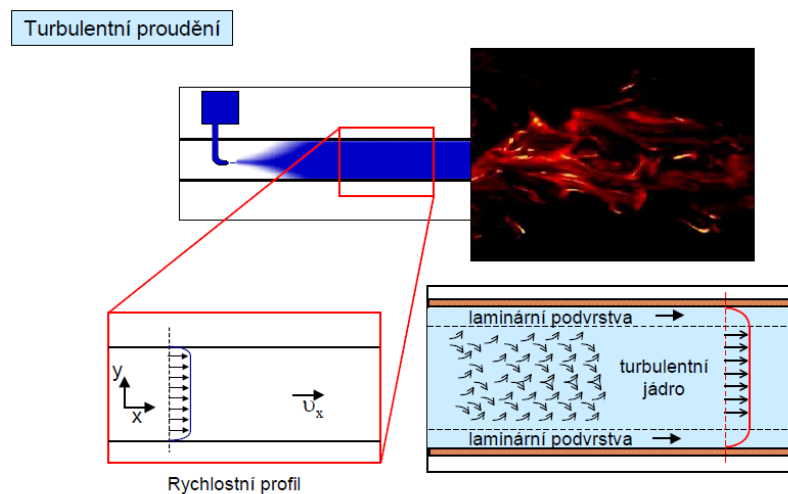
Je proudění vazké kapaliny, při kterém jsou proudnice rovnoběžné a nemísí se. Částice kapaliny se pohybují vedle sebe jakoby ve vrstvách. Mezi jednotlivými vrstvami se předpokládá existence vnitřního tření a platnost Newtonova zákona viskozity. [5]



Obr. 2.1 Laminární proudění [5]

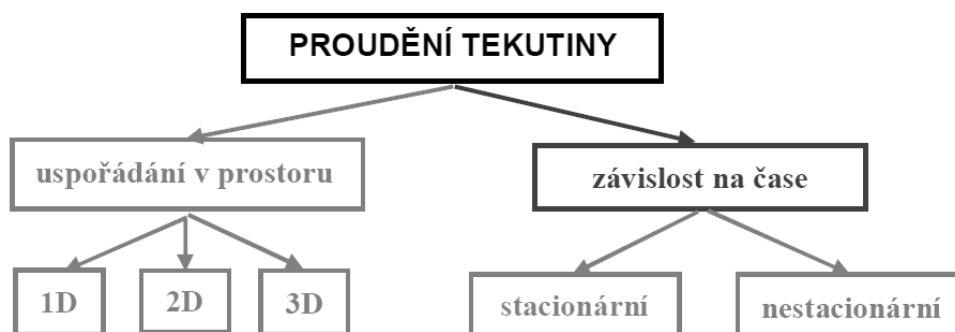
Turbulentní proudění

Je proudění vazké tekutiny, při kterém se proudnice navzájem promíchávají. Částice tekutiny vykonávají při proudění kromě posouvání i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů. Turbulentní proudění se objevuje při větších rychlostech proudění a u tekutin s menší přitažlivou silou mezi částicemi.[6]



Obr. 2.2 Turbulentní proudění [3]

2.2 Dělení tekutiny podle kinematických hledisek



Obr. 2.3 Dělení podle kinematických hledisek[2]

2.2.1 Dělení proudění dle uspořádání v prostoru

- proudění je třírozměrné neboli prostorové (3D), jestliže veličiny, např. rychlost, závisí na poloze v prostoru $v = v(x, y, z)$
- proudění dvourozměrné neboli rovinné (2D) je charakterizováno veličinami, jako je např. rychlost, závisí na poloze v rovině (osově symetrická proudění v potrubí) $v = v(x, y)$
- proudění jednorozměrné (1D) předpokládá závislost počítaných veličin na poloze na křivce (proudění v potrubních systémech) $v = v(s)$ [2]

2.2.2 Dělení proudění podle závislosti na čase

- proudění ustálené neboli stacionární nezávisí na čase $v \neq v(t); \frac{\partial}{\partial t} = 0$
- proudění neustálené neboli nestacionární je proudění, u něhož veličiny jsou závislé na čase, $v = v(x, y, z, t); v = v(s, t); v = v(t)$ [2]

2.3 Přestup tepla

Přestup tepla (sdílení tepla) je fyzikální jev, při kterém dochází na rozhraní dvou látek s různou teplotou k přenesení tepla z jedné látky na látku druhou. Jedná se o zvláštní případ vedení tepla. Sdílení tepla se řídí druhým zákonem termodynamiky, který v Carnotově-Calusiově verzi zní takto: „Teplu samo o sobě nemůže procházet z látky o teplotě nižší na látku o teplotě vyšší.“ [3]

Základní způsoby sdílení tepla:

- sdílení tepla vedením
- sdílení tepla prouděním
- sdílení tepla sáláním

Teplo, které prochází plochou, nám určuje tepelný tok. Množství tepla, které projde plochou za jednotku času, nazýváme hustota tepelného toku.

Základní zákon vedení tepla je Fourierův zákon. Tento zákon má tvar:[3]

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t \quad (2.1)$$

Veličina q v rovnici nám vyjadřuje množství tepla v joulech $[J]$ proteklého jednotkou plochy, kolmou na směr proudění za jednotku času a nazýváme ji hustotou

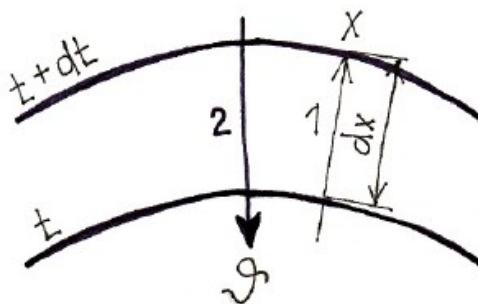
tepelného toku. Jelikož množství tepla, které projde za jednotku času je výkon a jednotka výkonu je watt $[W]$, lze hustotu tepelného toku vyjádřit ve $[W.m^{-2}]$.

Poměr $\frac{dt}{dx}$ se nazývá teplotní gradient. Tento teplotní gradient nám označuje poměr přírůstku teploty dt ke vzdálenosti dx mezi izotermními plochami. Izotermní plocha je geometrické místo bodů o stejné teplotě ve směru rovnováhy viz obr. 2.4[3]

$$grad\ t = \frac{dt}{dx} [K.m^{-1}] \quad (2.2)$$

Teplotní růst (gradient) je míra změny teploty v daném místě a má rozměr $[K.m^{-1}]$. Teplotní gradient, který označujeme znaménkem – se nazývá teplotní spád. Množství prošlého tepla za časovou jednotku je dáno rovnicí 2.3 [4]

$$Q = \vartheta \cdot A = \lambda \cdot \frac{dt}{dx} \cdot A \quad (2.3)$$



Obr. 2.4 Náčrt k teplotnímu gradientu [4]

1-směr teplotního gradientu

2-směr tepelného toku

Prostup tepla rovinnou stěnou

Při prostupu tepla jednoduchou rovinnou stěnou lze vyjádřit třemi rovnicemi.

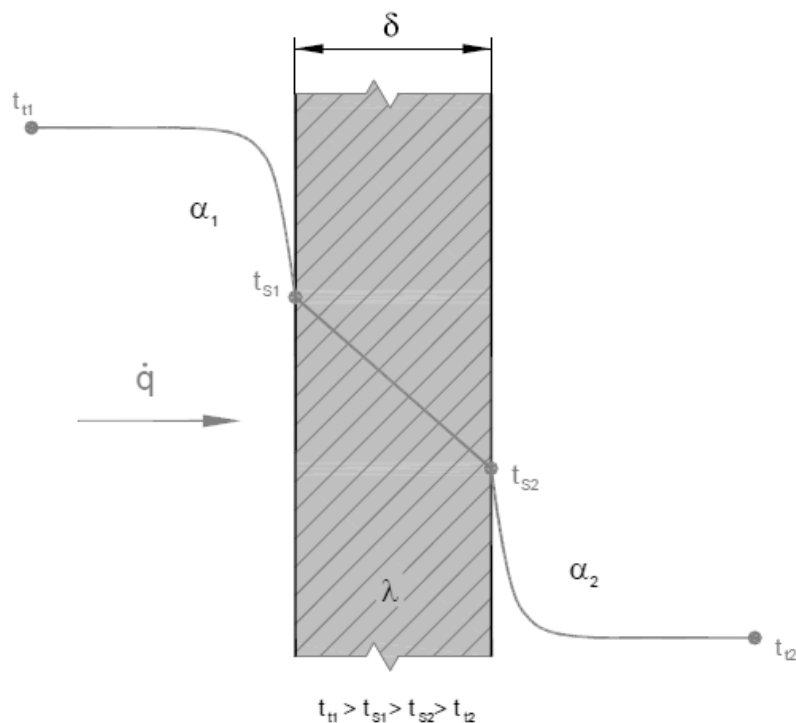
$$t_t - t_{s1} = \dot{q} \cdot \frac{1}{\alpha_1} \quad (2.4)$$

$$t_{s1} - t_{s2} = \dot{q} \frac{s}{\lambda} \quad (2.5)$$

$$t_{s2} - t_{t2} = \dot{q} \cdot \frac{1}{\alpha_2} \quad (2.6)$$

Sečtením rovnic 2.4, 2.5, 2.6 získáme vztah pro stanovení plošné hustoty tepelného toku při prostupu tepla jednoduchou rovinnou stěnou. [7]

$$\dot{q} = \frac{t_{t1} - t_{t2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = k \cdot (t_{t1} - t_{t2}) \quad (2.7)$$



Obr. 2.5 Prostup tepla stěnou [7]

2.4 Matematický model proudění vody s přestupem tepla

2.4.1 Základní rovnice proudění

Všechny druhy CFD systémů vycházejí ze tří základních fyzikálních zákonů, které popisují jednotlivé druhy proudění. Tyto zákony se nazývají: zákon o zachování hybnosti, zákon o zachování energie a zákon o zachování hmotnosti. Souhrnně je nazýváme „pohybové rovnice tekutin“. Tyto zákony popisují laminární i turbulentní proudění média.

Každý z těchto zákonů popisuje vlastní matematická rovnice:

- Zákon zachování hybnosti - pohybová rovnice
- Zákon zachování energie - energetická rovnice
- Zákon zachování hmotnosti – rovnice kontinuity

2.4.2 Zákon zachování hybnosti

Při proudění skutečné tekutiny je rovnováha sil vyjádřena Navier – Stokesovými rovnicemi. Dané rovnice vyjadřují vztah kde je setrvačná síla rovna součtu hmotnostní, smykové a tlakové síly.[8]

Je zde použita aplikace druhého Newtonova zákona,

$$F = m \cdot a \quad (2.8)$$

kde na vybraný model viskózní tekutiny se získá rovnice hybnosti. Nejlépe lze tuto rovnici získat za pomoci aplikace na elementární kontrolní objem dV . Podobně jako při odvozování rovnice kontinuity, kde je rovnováha sil vyjádřena vektorovým součtem sil.

$$\vec{F}_s = \vec{F}_m + \vec{F}_p + \vec{F}_t \quad (2.9)$$

Setrvačná síla F_s je dána setrvačným zrychlením a hmotností elementárního hranolku tekutiny. Vnější hmotnostní síla F_m , která působí na kapalinu, se vyjádří na jednotku hmotnosti tekutiny za pomoci složek zrychlení $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ (toto jsou složky derivace v daných směrech). Tlaková síla F_p je dána složkami normálového napětí $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ a síla smyková F_t je dána smykovými napětími τ_x, τ_y, τ_z . Obecný zápis Navier – Stokesovy rovnice je.[1]

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j = G_i - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\lambda + \mu}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\mu}{\rho} \Delta v_i \quad (2.10)$$

Pro nestlačitelnou kapalinu se rovnice zjednoduší tím, že v rovnici 2.10 bude platit $\frac{\partial v_i}{\partial x_j} = 0$.

Navier - Stokesova rovnice bude poté vypadat takto:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j = G_i - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \Delta v_i \quad (2.11)$$

Z tenzorového tvaru Navier – Stokesovy rovnice je patrné, že zastává tři složkové rovnice pro trojrozměrné proudění.

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x = G_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \Delta v_x \quad (2.12)$$

2.4.3 Zákon o zachování hmotnosti

Je základní rovnice pro řešení problémů spojených s prouděním kapalin, která je založena na bilanci proudící kapaliny. Hmotnostní tok stěnou označovanou s o objemu V , který je roven rychlosti změny hmotnosti kapaliny v daném objemu. Pro kontrolní objem, ve kterém proudí kapalina, musí být hmotnost tekutiny konstantní. Z tohoto plyne, že její celková změna je nulová. V kontrolním objemu mohou vzniknout dva případy změny hmotnosti:

- **lokální neboli časová změna** – v kontrolním objemu se kapalina rozpíná nebo stlačuje
- **konvektivní změna** – je způsobena rozdílem přitékající a odtékající hmotnosti z kontrolního objemu.

Součet obou těchto změn průtoku se musí rovnat nule. Případně zdrojovému členu S_z . Toto je možné pouze v případě, pokud mají obě změny stejnou velikost, ale jiná znaménka. Tím pádem jedna působí zvýšení a naopak ta druhá snížení hmotnosti. Aplikací zákona zachování hmotnosti na zvolený kontrolní model kapaliny, například elementární hranol o objemu $dV=dx \cdot dy \cdot dz$ (viz. Obr. 2.6), dostaneme rovnici kontinuity v diferenciálním tvaru.[1]

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \quad (2.13)$$

Tato rovnice se nazývá obecná rovnice kontinuity pro neustálené prostorové proudění stlačitelné kapaliny.

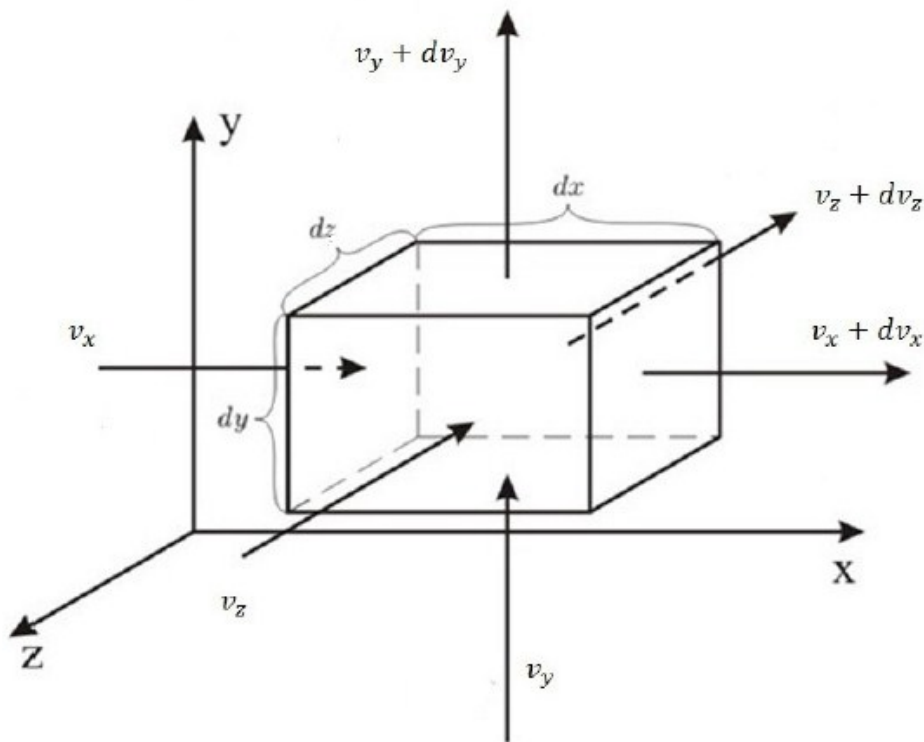
Při ustáleném proudění se veličiny nemění v čase, proto platí $\frac{\partial(\rho)}{\partial t} = 0$

Rovnice kontinuity se změnila na tvar:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = S_z \quad (2.14)$$

Při ustáleném proudění nestlačitelné kapaliny, u níž je hustota ρ konstantní je rovnice vyjádřena vztahem:

$$\frac{\partial(v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = S_z \quad (2.15)$$



Obr. 2.6 Elementární objem tekutiny[2]

2.4.4 Zákon zachování energie

Zákon zachování energie je téměř vyjádřením prvního zákona termodynamiky. Pokud se princip aplikuje na vybraný model kapaliny, například na nekonečně malý element kapaliny, který se pohybuje s okolní kapalinou, poté první zákon termodynamiky vyjadřuje, že rychlost změny energie v elementu je rovna toku tepla do elementu a intenzitě práce plošných a objemových sil, které působí na daný element.

Obecný složkový zápis rovnice poté bude:

$$\rho v_i \cdot \frac{dv_i}{dt} + \rho c \frac{dT}{dt} = \rho G_i v_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\tau_{ij} v_i) \quad (2.16)$$

Uvedené rovnice nám vyjadřují jednotlivé zákony. Lze je využít pro oba typy proudění, jak laminární tak turbulentní. Pro laminární vytvářejí uzavřenou soustavu rovnic. Řešení turbulentního proudění je náročnější, kde jednotlivé veličiny představují okamžité hodnoty náhodných nestacionárních veličin a tudíž každé řešení je pouze určitou aproximací.[1]

2.5 Turbulentní proudění kapalin

Proudění skutečných kapalin může být definováno jako turbulentní nebo laminární proudění. U proudění turbulentního bylo zjištěno, že na okrajích tělesa nebo stěnách potrubí vzniká tenká vrstva laminárního proudění. Tato vrstva se nazývá laminární podvrstva a tloušťka této vrstvy se pohybuje v desetinách milimetrů. Pod touto vrstvou se nachází tzv. přechodová vrstva, která odděluje právě laminární vrstvu od turbulentního jádra.[2]

U jednorozměrného proudění je turbulentní přechod udáván experimentálně určeným kritickým Reynoldsovým číslem Re . Toto číslo je definováno vztahem

$$Re = \frac{v_s d}{\nu} \quad (2.17)$$

kde v_s je střední rychlost v potrubí, d je průměr a ν je kinematická viskozita. Reynoldsovo číslo lze také vypočítat ze vztahu viz 2.17 [4]

$$Re_l = \frac{u \cdot l}{\nu} \cdot \frac{l}{l} = \frac{\frac{l^2}{\nu}}{\frac{l}{u}} = \frac{T_v}{T_t} \quad (2.18)$$

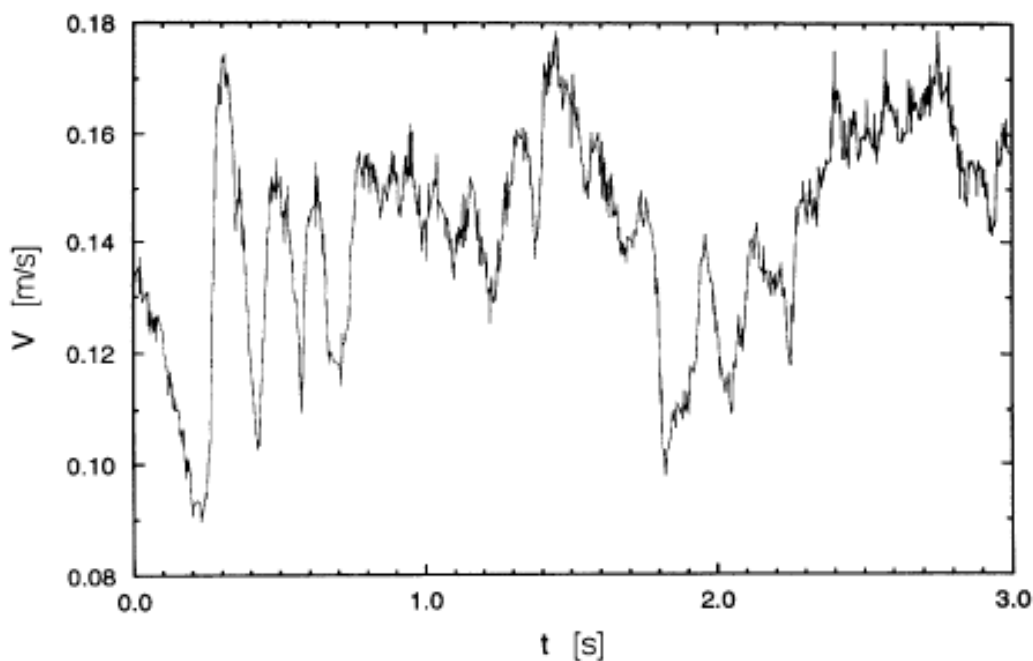
T_t je časové měřítko přenosu turbulentních vírů a T_o značí časové měřítko molekulární difúze.

Proudění lze dále charakterizovat podle Re takto:

- $T_v < T_t t j. Re_l < 1$ laminární proudění
- $T_v > T_t t j. Re_l > 1$ turbulentní proudění
- $T_v \gg T_t t j. Re_l \gg 1$ plně vyvinutá turbulence

Dále existuje kritická hodnota Reynoldsova čísla $Re_{krit.}$ Kritická hodnota je například u potrubí kruhového průřezu 2320. Pokud námi vypočtené Re bude větší než $Re_{krit.}$ začnou se částice pohybovat všemi možnými směry, tudíž říkáme, že konají neuspořádaný pohyb. Tento pohyb lze přirovnat k pohybu molekul plynu, s tím rozdílem, že se tyto částice tekutiny mohou rozpadat a tím ztrácet svou identitu.[2]

Proudění se obecně nazývá turbulentní, jestliže jeho proměnné vykazují chaotické fluktuace jak v prostoru, tak v čase.

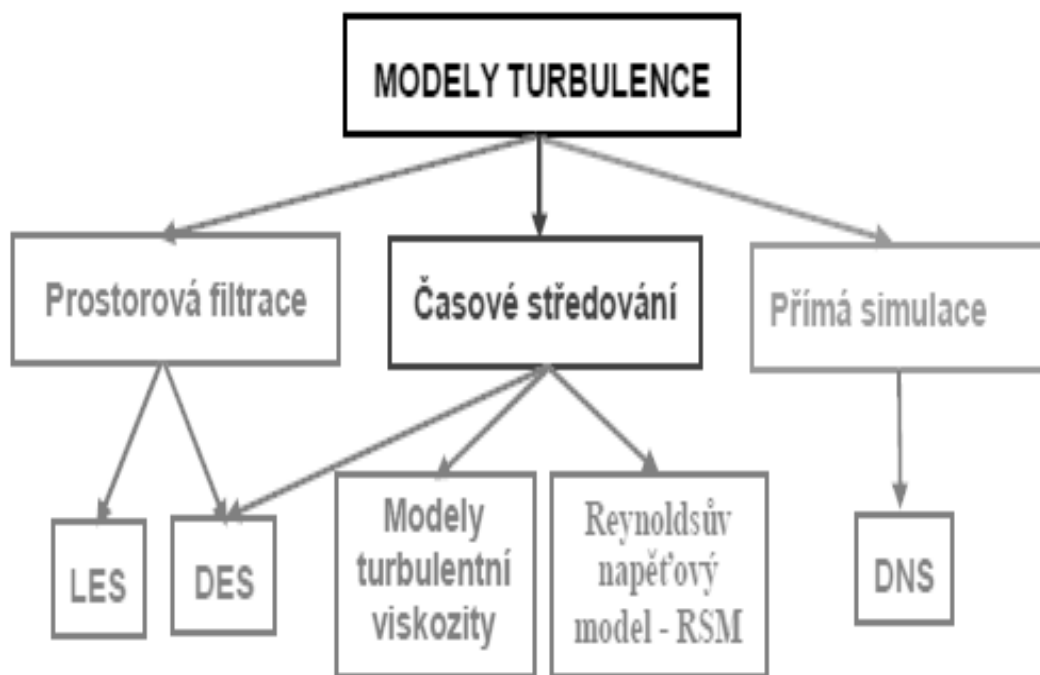


Obr.2.7 Plně vyvinuté turbulentní proudění – rychlost jako funkce času

2.5.1 Vlastnosti turbulentního proudění

- Náhodný pohyb částic tekutiny a objemů, které obsahují velké množství molekul. Pohyb částic je složen z uspořádaného středního pohybu a z náhodných fluktuací, z čehož vyplývá analogie mezi chováním molekul. Tento děj se nazývá Brownův pohyb molekul. Vlivem fluktuací se může dostat molekula z oblasti větší makroskopické rychlosti do oblasti menší makroskopické rychlosti, kde při nárazu na jinou molekulu zpomalí a předá jí svou část energie, což způsobí naopak zrychlení této druhé molekuly. V opačném případě, kdy přechází molekula z menší makroskopické rychlosti do oblasti větší rychlosti, kdy se hybnost při nárazu zvětší. Tímto dochází ke sdílení hybnosti mezi oblastmi tekutiny s rozličnou rychlostí, což se projevuje jako vnitřní tření tekutiny.
- Tečné napětí, vzniká u turbulentního proudění, není určeno pouze vnitřním třením v tekutině a rychlostním gradientem jako tomu je u laminárního proudění (Newtonův zákon $\tau = \eta \frac{dv}{dy}$), ale změnou makroskopických částíček, jako následek jejich pronikání mezi sousední vrstvy. Tento neuspořádaný pohyb vyvolá tzv. přídavné turbulentní napětí.
- Turbulentní viskozita, o níž nelze mluvit jako o fyzikální konstantě tekutiny, jako tomu je u molekulové viskozity laminárního proudění, ale jako o složité funkční závislosti stavu proudící tekutiny a poloze uvažovaného bodu. Z tohoto důvodu rychlostní profil u turbulentního proudění ve srovnání s laminárním je více plochý.
- Difuzní charakter turbulence, kdy gradienty rychlosti vyvolané turbulentními fluktuacemi rychlostí jsou zdrojem vazkých napětí a disipace energie. Zvyšuje se tak vnitřní energie tekutiny na úkor kinetické energie turbulence. Turbulence proto potřebuje trvalý přísun energie ke krytí těchto ztrát, jinak rychle zaniká.[2]

2.5.2 Matematické modely turbulentního proudění



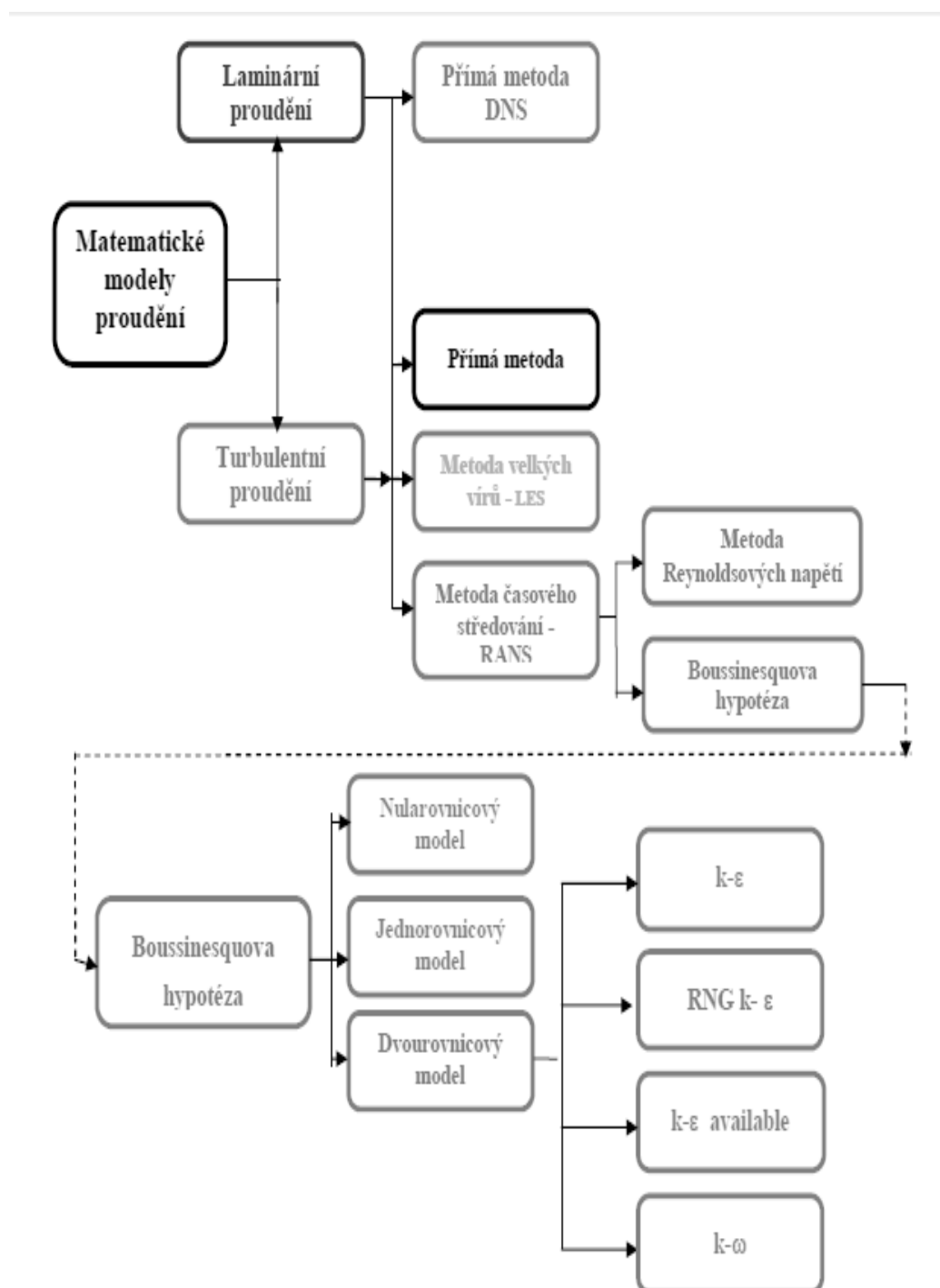
Obr. 2.8 Modely turbulence [2]

Turbulentní modelování je stále ve fázi vývoje a výzkumu, který se mění v závislosti na matematickém, technickém a fyzikálním odvětví. Při numerické simulaci existují tři různé přístupy.[2]

- Metoda přímé simulace neboli DNS
- Metoda velkých vírů LES
- Metoda časového středování RANS

2.5.3 Statistické modely turbulence

Soubor empirických vztahů a přídavných rovnic, které společně s pohybovými rovnicemi, tvoří řešitelný systém rovnic, nazýváme modelem turbulence. Modely turbulence jde dělit do několika skupin dle obr. 2.8



Obr. 2.9 Schéma metod řešení proudění[4]

2.5.4 Dvourovnicové modely turbulence

Turbulentní modely založené na Boussinesquově hypotéze řeší hodnotu turbulentní viskozity pomocí dodatkových rovnic. Podle počtu diferenciálních rovnic se volí pojmenování modelu.

Model $k-\varepsilon$ Standart

Tento model určuje viskozitu pomocí dvou transportních rovnic. Jedna rovnice je pro k , druhá pro ε . Tento model využívá Boussinesquovy hypotézy o vírové viskozitě, kde vztahuje μ_t ke k , ε a C_μ což je empirická konstanta.[2]

$$\mu_t = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.19)$$

Model $k-\omega$

$k-\omega$ model řeší stejně jako model $k-\varepsilon$ dvě dodatkové diferenciální rovnice. Rychlostní měřítko je řešeno pomocí turbulentní kinetické energie k . Délkové měřítko je řešeno pomocí jednotky, která se nazývá vířivost $[s^{-1}]$. Vířivost nám udává míru rotace kapaliny v daném bodě proudového pole.

Standardní model $k-\omega$ se běžně používá pro proudění s malým Reynoldsovým číslem a úlohy s přechodovým režimem proudění, kde není plně vyvinuta turbulence.[10]

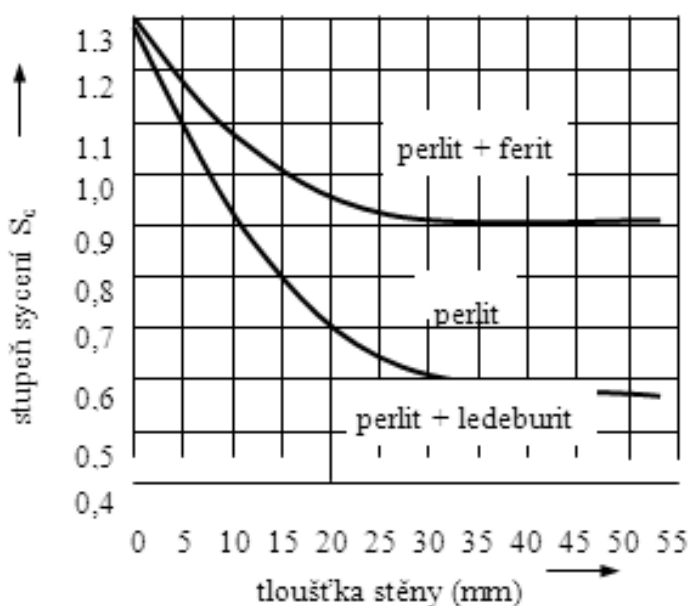
$$\mu_t = a^* \cdot \frac{k}{\omega} \quad (2.20)$$

3. 3D model článku kotle s uvažováním přestupu tepla

3.1 Materiál článku

Pro výrobu článků kotle se využívá tzv. litina s lupínkovým grafitem. Dříve se této litině říkalo šedá litina. Tato litina má ve struktuře lupínkový neboli lamelární grafit. Kromě tohoto grafitu obsahuje ferit, perlit nebo jejich směsi.

Mechanické vlastnosti litiny jsou ovlivněny kromě tvaru, množstvím a velikostí grafitu, chemickým složením a rychlostí ochlazování. Tyto faktory určují konečnou podobu matrice litiny. Chemické složení nám také ovlivňuje polohu eutektického bodu. Vliv chemického složení a zároveň rychlosti ochlazování na strukturu matrice nám znázorňuje Sippův diagram obr 3.1 [11]



Obr. 3.1 Sippův diagram- vliv stupně eutektičnosti a rychlosti ochlazování odlitku na strukturu LLG[11]

Šedá litina má také díky svému tvaru grafitu nejhorší plastické vlastnosti (téměř žádnou tažnost). To, že je grafit téměř spojitý rozvětvený útvar, se projevuje kladně na slévarenských vlastnostech, které jsou díky sbíhavosti a relativně malým sklonem k smršťování, nejlepší z grafických litin. Tyto litiny mají především daleko lepší tepelnou vodivost než oceli. Ke zlepšení pevnostních charakteristik používáme očkování litin. [11]

Použití a mechanické vlastnosti

Litiny s lupínkovým grafitem lze rozdělit podle použití do tří hlavních skupin:

- Litiny pro běžné použití
- Litiny se zaručenými mechanickými vlastnostmi
- Litiny s vysokou pevností

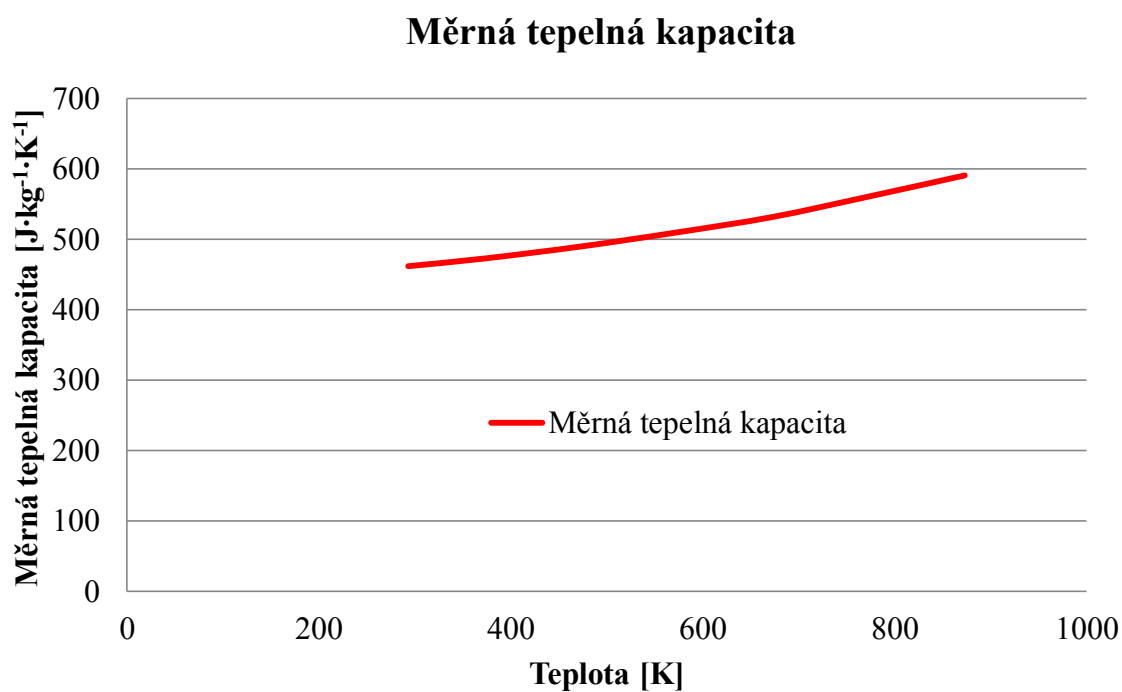
Litiny pro běžné použití jsou dvojího typu EN GJL-100 a EN GJL-150. Dané litiny se využívají pro tenkostěnné odlitky s tloušťkou stěny od 4 mm do 30 mm, nebo u odlitků, kde se nevyžaduje záruka mechanických vlastností. Používají se pro výrobu součástí pecí, kotlů, roštů atd. Základní parametry nalezneme na obr. 3.2[11]

Vlastnost			Označení litiny dle EN a ČSN				
			EN-GJL-150 (EN-JL 1020) 42 2415	EN-GJL-200 (EN-JL 1030) 42 2420	EN-GJL-250 (EN-JL 1040) 42 2425	EN-GJL-300 (EN-JL 1050) 42 2430	EN-GJL-350 (EN-JL 1060) 42 2435
			struktura				
			feriticko perlitická	perlitická			
Pevnost v tahu	R_m	N/mm ²	150 až 250	200 až 300	250 až 350	300 až 400	350 až 450
Smluvní mez kluzu	$R_{p0,1}$	N/mm ²	98 až 165	130 až 195	165 až 228	195 až 260	228 až 285
Tažnost	A	%	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3	0,8 až 0,3
Pevnost v tlaku	σ_{dh}	N/mm ²	600	720	840	960	1080
Pevnost v ohybu	σ_{bB}	N/mm ²	250	290	340	390	490
Pevnost ve stříhu	σ_{sR}	N/mm ²	170	230	290	345	400
Pevnost v krutu	T_{tB}	N/mm ²	170	230	290	345	400
Max. tvrdost	HB		200	200	240	260	270
Modul pružnosti	E	kN/mm ²	78 až 103	88 až 113	103 až 118	108 až 137	123 až 143
Poissonův poměr	ν	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Únavová pevnost v ohybu	σ_{bW}	N/mm ²	70	90	120	140	145
Mez únavy, tah-tlak	σ_{-1W}	N/mm ²	40	50	60	75	85
Lomová houževnatost	K_{IC}	N/mm ^{3/2}	320	400	480	560	650
Hustota	ρ	g/cm ³	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30
Měrné teplo 20°C-200°C 20°C-600°C	c	1/(kg.K)	460 535				
Měrný odpor	ρ	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	0,80	0,77	0,73	0,70	0,67

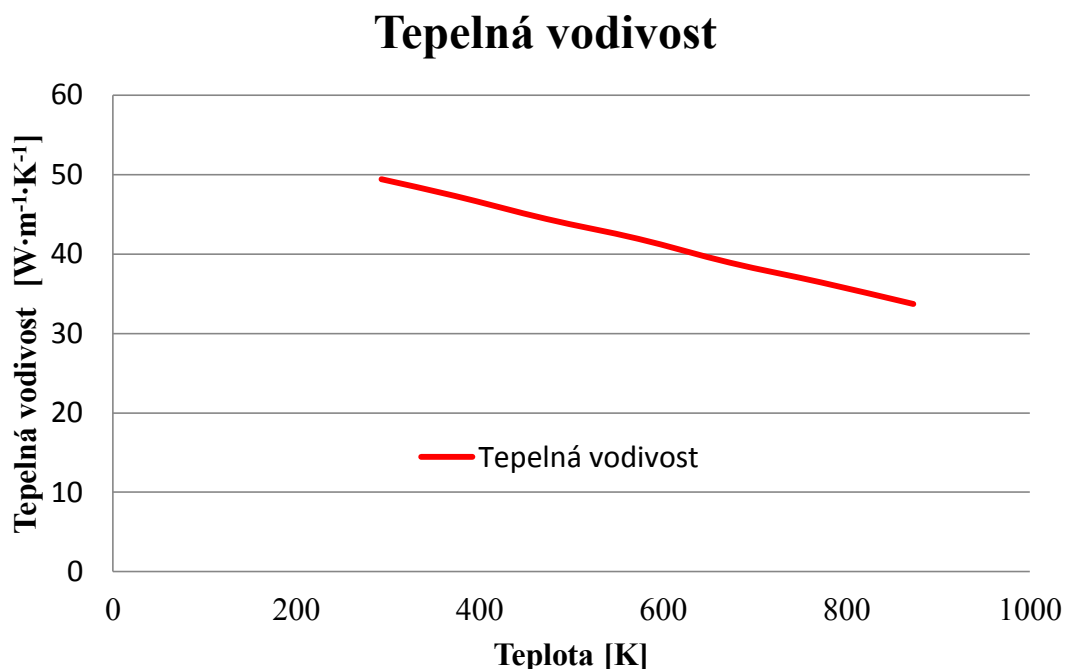
Obr. 3.2 Mechanické a fyzikální vlastnosti šedých litin[11]

Tab.1 vlastnosti litiny EN GJL-150 [1]

	Teplota	Tepelná vodivost	Měrná tepelná kapacita
T	T	λ_L	C_{pL}
[°C]	[K]	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
20	293	49,4	462
100	373	47,3	473
200	473	44,4	490
300	573	41,9	510
400	673	38,9	532
500	773	36,4	561
600	873	33,7	591



Graf 1. Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě pro litinu EN GJL-150



Graf 2. Závislost tepelné vodivosti na teplotě pro litinu EN GJL-150

3.2 Geometrie článku a výpočtová síť

Geometrie článku byla zpracována dle firemního zadání. Pro zpracování a upravení dané geometrie bylo využito softwaru ANSYS FLUENT a INVENTOR. V softwaru INVENTOR bylo nutno danou geometrii upravit a odstranit vyražené označení článku kotle. Tato úprava byla provedena z důvodu návaznosti na software ANSYS FLUENT. Numerická metoda konečných objemů je založena na vytvoření systému nepřekrývajících se elementů, konečných objemů.

3.3 Okrajové podmínky

Hmotnostní průtok na vstupu (Mass-flow inlet)

Tuto podmínku lze použít, pokud proudění, které se zadává, je stlačitelné. Jinak je tato podmínka téměř totožná s podmínkou rychlosti na vstupu. Hmotnostní průtok se stanoví dle vzorce 3.1, kde u je rychlost na vstupu a S je průtočný průřez. [2]

$$Q_m = \rho \cdot Q = \rho \cdot u \cdot S \quad (3.1)$$

Tlak na výstupu (Outflow)

Tato podmínka se zadává v podobě statického tlaku. Tento statický tlak se definuje jen v případě subsonického proudění. Pokud by bylo proudění supersonické, tak se tlak i ostatní veličiny extrapolují z proudění uvnitř oblasti.

Okrajová podmínka stěny (Wall)

Tato podmínka nám představuje hranici neprostupného povrchu. Jedná se zde o definování pevné části (stěny), která nám vymezuje hranice mezi vstupem a výstupem kapaliny. Je zde také nutno počítat s možností výskytu mezní vrstvy.

3.4 Zadané vstupní a výstupní hodnoty článku kotle

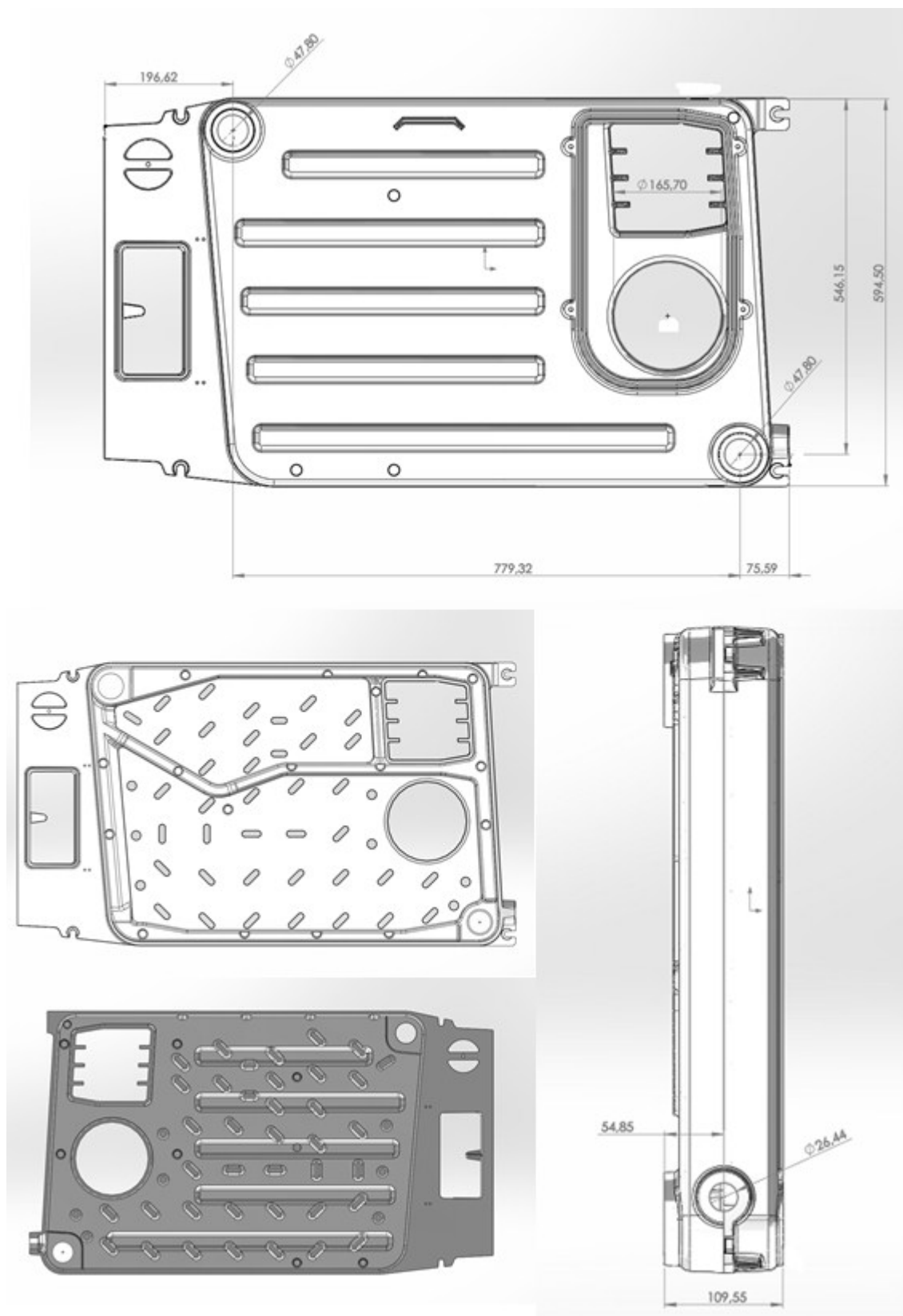
Obdržené vstupní a výstupní podmínky od zadavatele.

- Objemový průtok $Q_V = 5 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

Přepočet objemového průtoku na hmotnostní průtok

$$Q_m = \rho \cdot Q_V = 998 \cdot \frac{5}{60000} = 0,08316$$

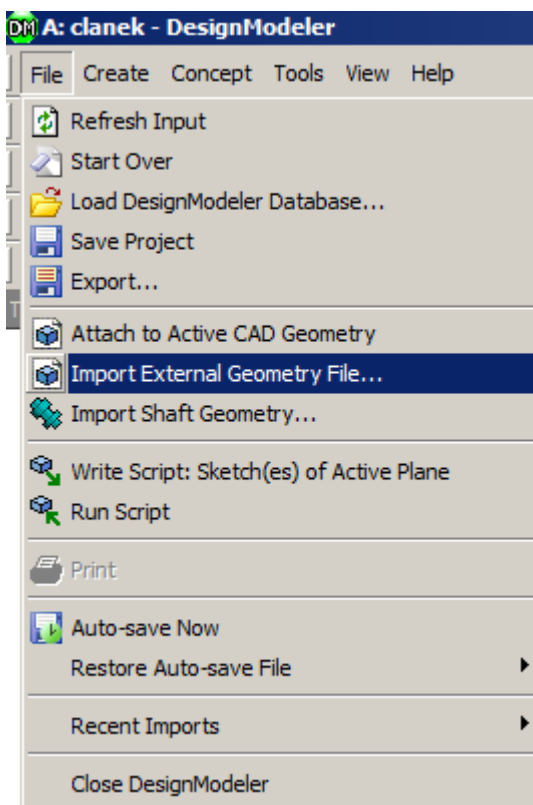
- Teplota na vstupu $T_{vs} = 35^\circ \text{C}$
- Předpokládaná teplota na výstupu $T_{vy} = 70^\circ \text{C}$
- Teplota na stěně článku kotle $T_s = 220^\circ \text{C}$



Obr. 3.3 Zadaný člunek kotle

4. Simulace proudění vody s přestupem tepla článkem kotle

Převod a úprava článku je prováděna v softwaru ANSYS WORKBENCH. Soubor obsahující geometrii článku kotle byl dodán firmou ve formátu „step“. V programu ANSYS WORKBENCH byl vytvořen nový soubor pod názvem článek. Import souboru byl proveden v sekci DESIGN MODELER pomocí funkce IMPORT EXTERNAL GEOMETRY FILE viz Obr. 4.1

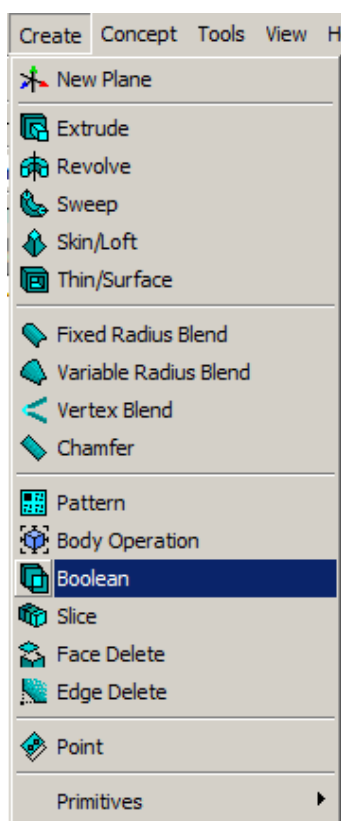


Obr. 4.1 Import zadané geometrie

Následně bylo provedeno zamražení pomocí příkazu ADD FROZEN.

4.1 Vytvoření vnitřního objemu

Pro vytvoření vnitřního objemu je nutno vytvořit novou skicu (na vytvořené rovině procházející středem zadané geometrie). Danou skicu vytáhneme pomocí příkazu EXTRUDE symetricky na obě strany o hodnotu 50 mm. Tato hodnota nám zaručí, že vytažená oblast nepřesáhne celou zadanou geometrii a zůstanou zde odkryté oblasti vstupu a výstupu. Následně lze použít finální příkaz BOOLEAN pro vytvoření požadovaného vnitřního objemu (FLUID) a vnějšího objemu (SOLID). Nastavení příkazu BOOLEAN se provede vybráním v záložce OPERATION, kde se zvolí typ SUBTRACT. Dále se nastaví TARGET BODIES (vytažený objem), TOOL BODIES (importovaný článek) a zaškrtně se YES v PRESERVE TOOL BODIES. Vygenerují se 3 PARTS, 3 BODIES.

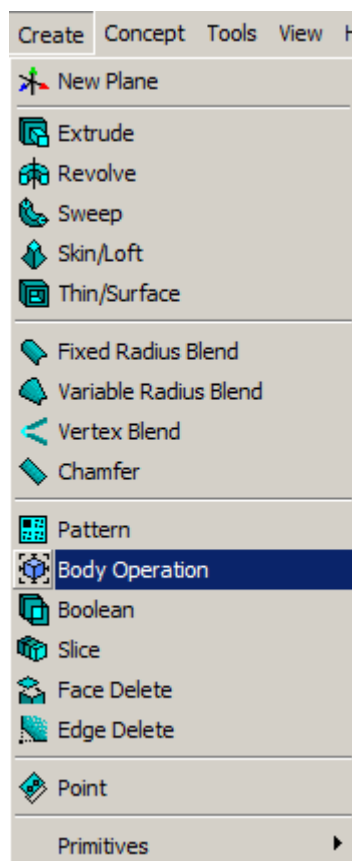


Obr. 4.2 Vytvoření BOOLEAN

Details View	
Details of Boolean2	
Boolean	Boolean2
Operation	Subtract
Target Bodies	1 Body
Tool Bodies	1 Body
Preserve Tool Bodies?	Yes

Obr. 4.3 Nastavení funkce BOOLEAN

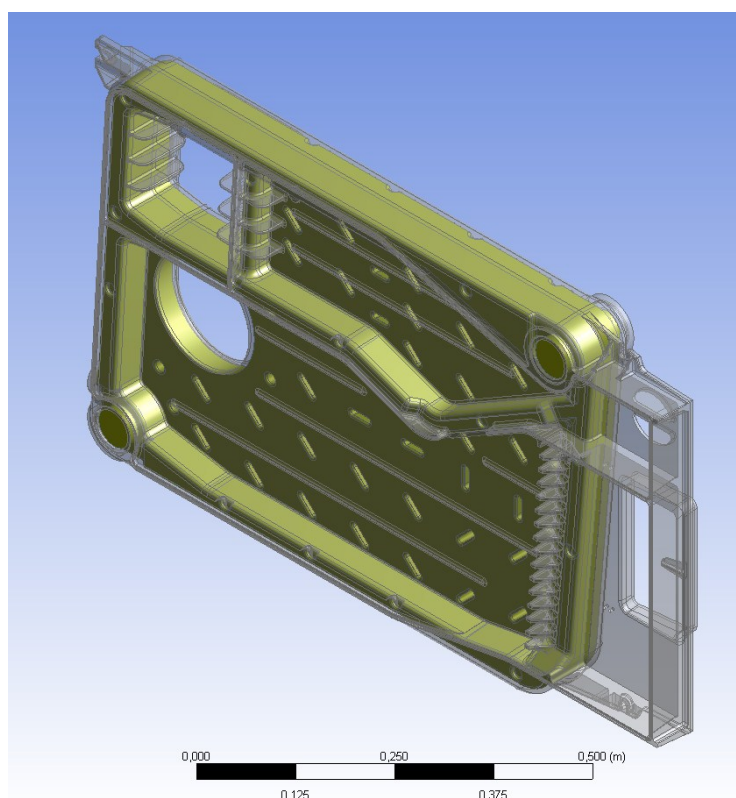
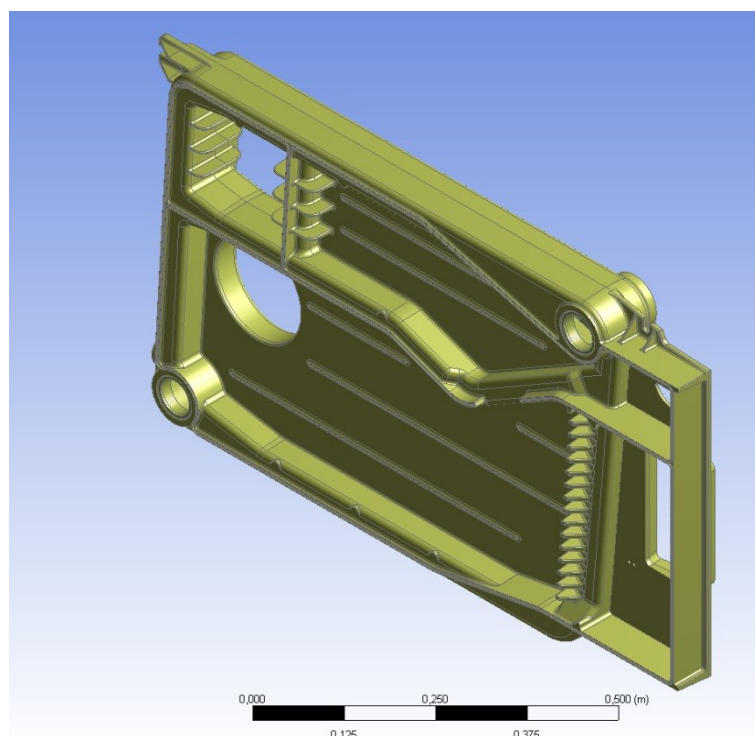
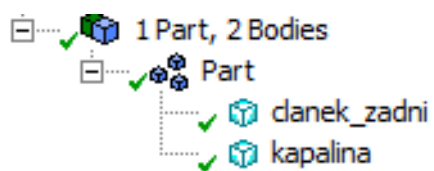
Následnou operací BODY OPERATION se odstraní přebytečný objem. Odstranění se provede příkazem DELETE, kde se vybere přebytečný part (provedené vytažení). Po odebrání se vytvoří požadované 2PARTS, 2BODIES. Následně se tyto party spojí příkazem FROM NEW PART.



Obr. 4.4 Vytvoření BODY OPERATION

Details View	
Details of BodyOp1	
Body Operation	BodyOp1
Type	Delete
Bodies	1

Obr. 4.5 Nastavení funkce BODY OPERATION



Obr.4.6 Požadované objemy

4.2 Vytvoření sítě (MESH)

Síť se vytvoří v programu ANSYS WORKBENCH v sekci MESH. V této sekci se volí vhodné nastavení sítě a požadovaná velikost elementů. Nastavení sítě má velký vliv na následné provedení výpočtů proto je třeba zvolit správně maximální a minimální velikosti elementů.

Nadefinování sítě pro danou geometrii:

- maximální velikost buněk 9 mm
- minimální velikost buněk 2 mm
- tvar elementů Automatický
- přechod rychlý
- vyhlazení nízké

Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Low
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	2,e-003 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	9,e-003 m
<input type="checkbox"/> Max Size	9,e-003 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,850)
Minimum Edge Length	2,6852e-007 m

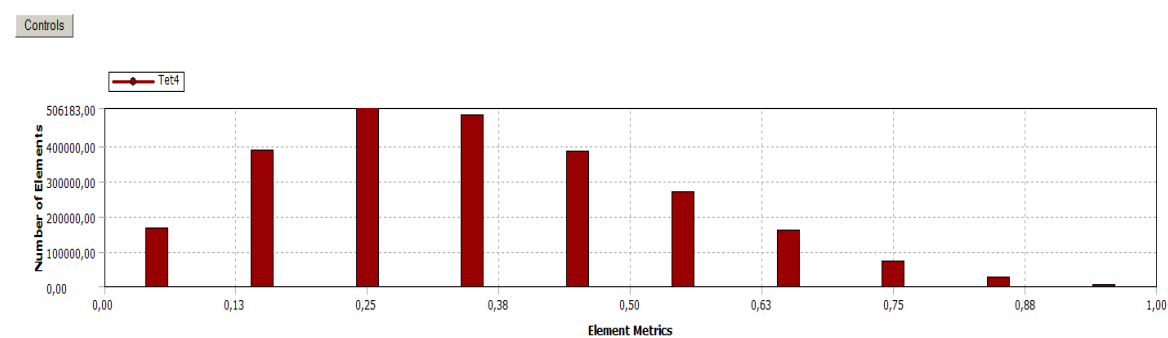
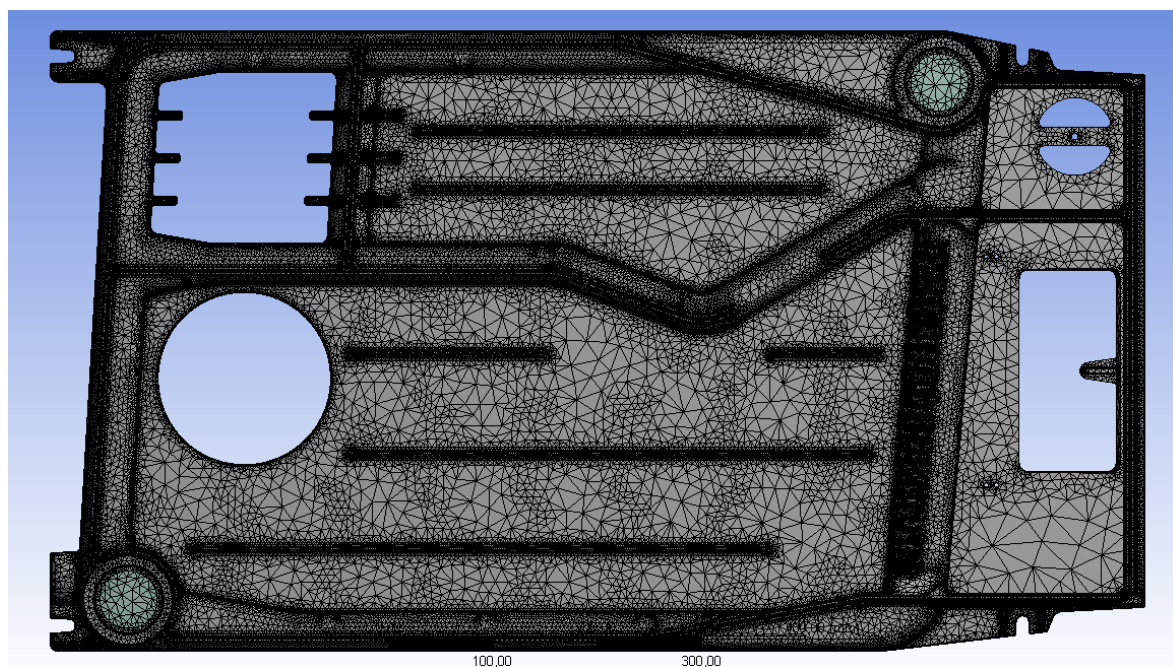
Obr. 4.7 Nastavení sítě

Vyhodnocení nastavené sítě:

Takto nastavený model, obsahuje 2 443 839 elementů což, splňuje zadání. Důležitým faktorem je kontrola SKEWNESS. Zde se ověřuje velikost úhlu provedené sítě. Hodnoty by neměly přesahovat 1 (tupý úhel). Pokud by tuto hodnotu přesahovala velká část elementů z velkou pravděpodobností by nebyl následný výpočet proveden správně.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	472007
<input type="checkbox"/> Elements	2443839
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	3,96833991085366E-05
<input type="checkbox"/> Max	0,999978128676177
<input type="checkbox"/> Average	0,351771995061657
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,181654899002155

Obr. 4.8 Vypočtené hodnoty sítě

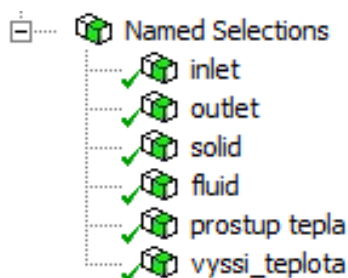


Obr. 4.9 Kvalita provedení síť

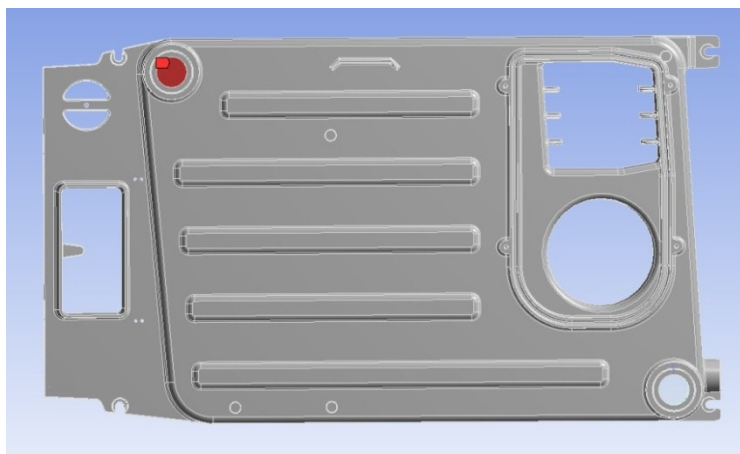
Na obr. 4.8 lze vidět kvalitu sítě, na které bude proveden následný výpočet matematických modelů.

4.3 Okrajové podmínky

V sekci MESH se nastaví oblast pro definování vstupních podmínek. Mezi tyto podmínky patří vstup (INLET), výstup (OUTLET), a stěnu (WALL). Tyto oblasti se vytvoří pomocí funkce NAMED SELECTION.

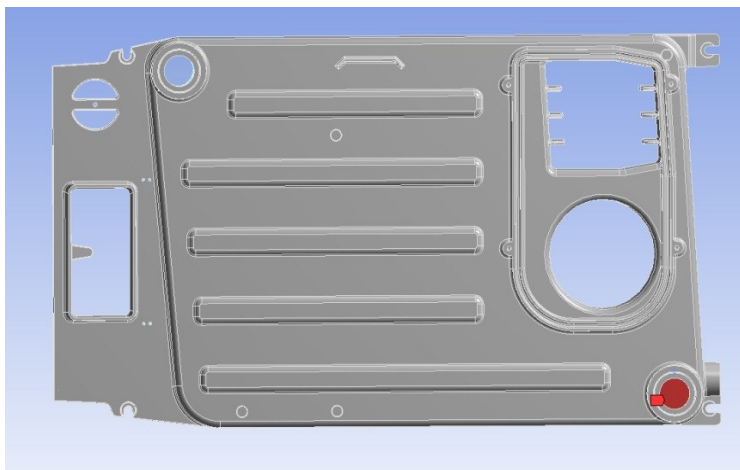


Obr. 4.10 Vytvořené named selection pro nastavení vstupních podmínek vstup (INLET)



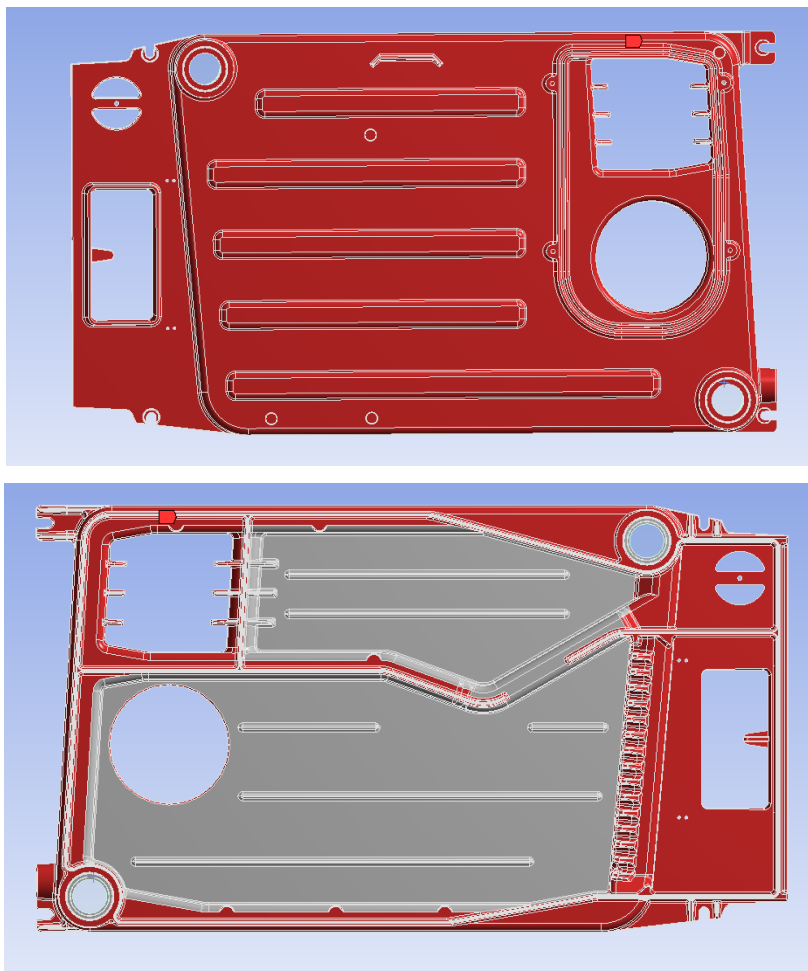
Obr. 4.9 Inlet

výstup (OUTLET)



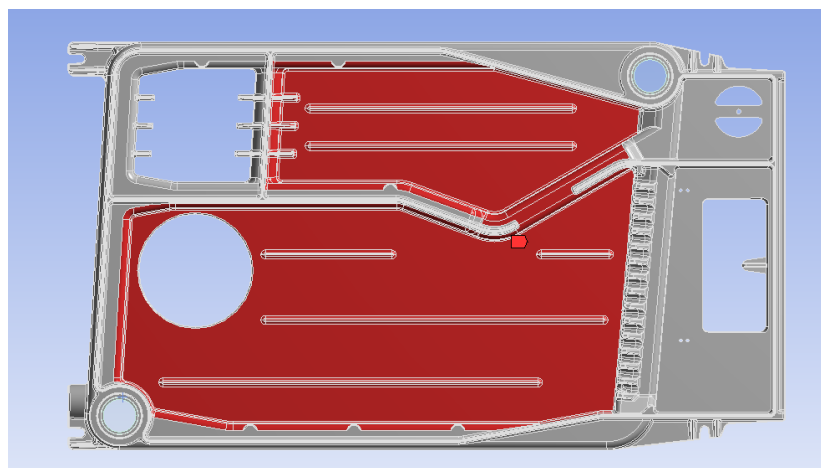
Obr. 4.10 Outlet

prostup tepla (WALL)



Obr 4.11 Wall 1 oblast na, kterou přímo nepůsobí spaliny

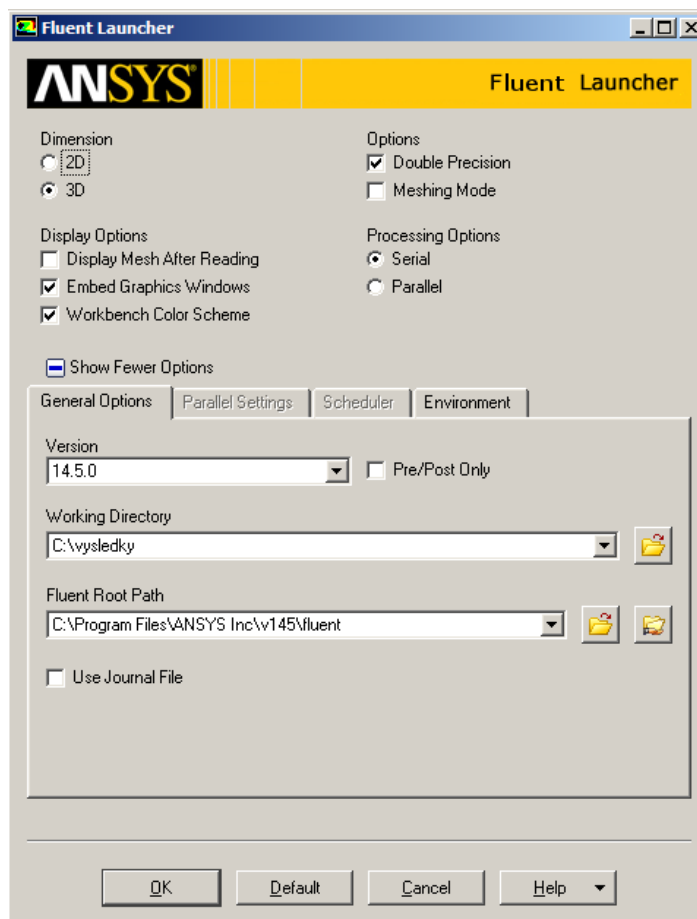
prostup tepla (WALL)



Obr 4.12 Wall 2 oblast, přímo působících spalin

4.4 Nastavení aplikace FLUENT

V programu ANSYS WORKBENCH se spustí FLUENT, program pro matematické modelování proudění a přestupu tepla, pomocí podzáložky. Po otevření se spustí komplexní startovací nabídka (LAUNCHER) pro specifikaci, kde bylo zvolena možnost DOUBLE PRECISION, což zaručuje zpřesnění daného výpočtu viz obr 4.12



Obr 4.12 Nastavení FLUENT Launcheru

Proběhne načítání dat z MESHE. Po načtení je nutno zkontrolovat velikost MESHE zda odpovídá předchozímu výpočtu. Tato kontrola se provede za pomoci příkazu MESH → SCALE viz obr. 4.13. Hodnoty musí odpovídat vypočteným hodnotám z předchozí kapitoly viz obr. 4.8

Mesh Size

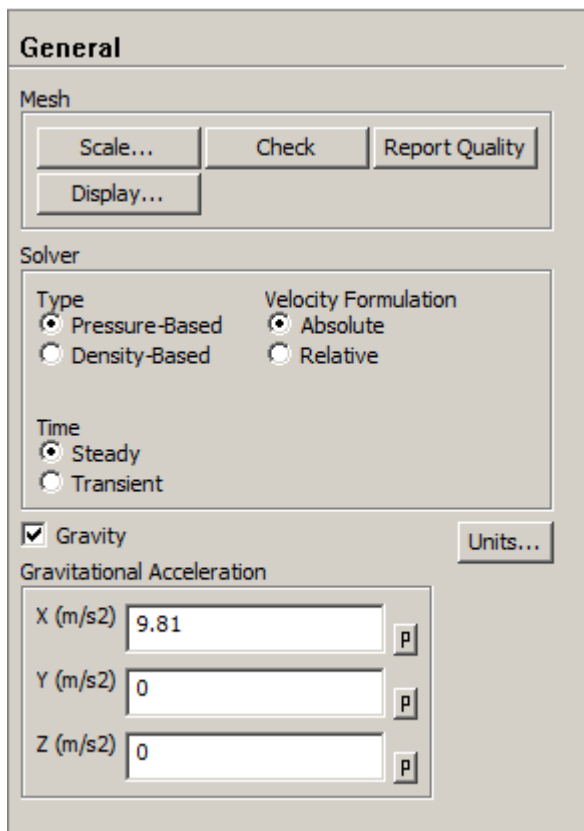
Level	Cells	Faces	Nodes	Partitions
0	2443839	5186061	562176	1

2 cell zones, 10 face zones.

Obr 4.13 Kontrola kvality sítě ve FLUENTU

4.4.1 Nastavení záložky General

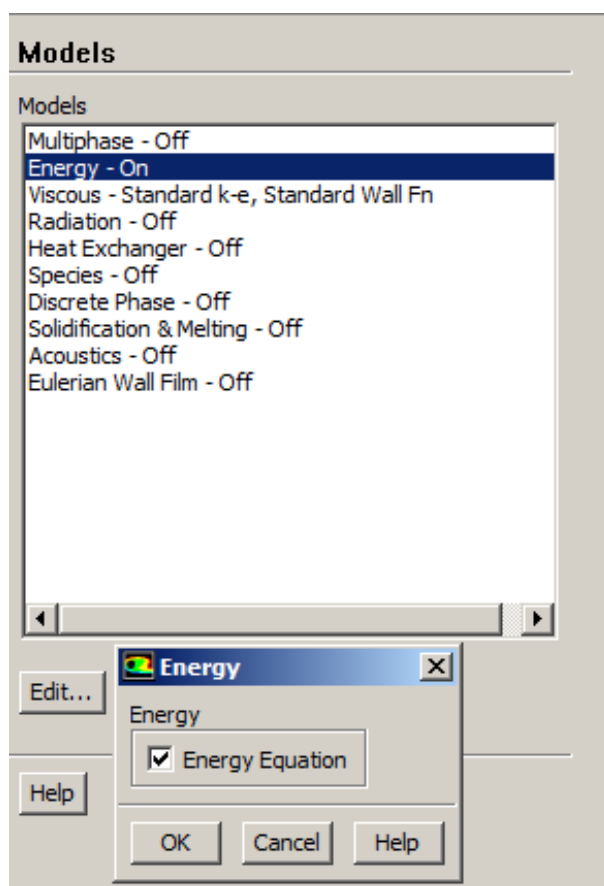
V záložce GENERAL se nastavuje položka GRAVITY podle orientace dané geometrie. Hodnota gravitace je 9.81 viz Obr. 4.13



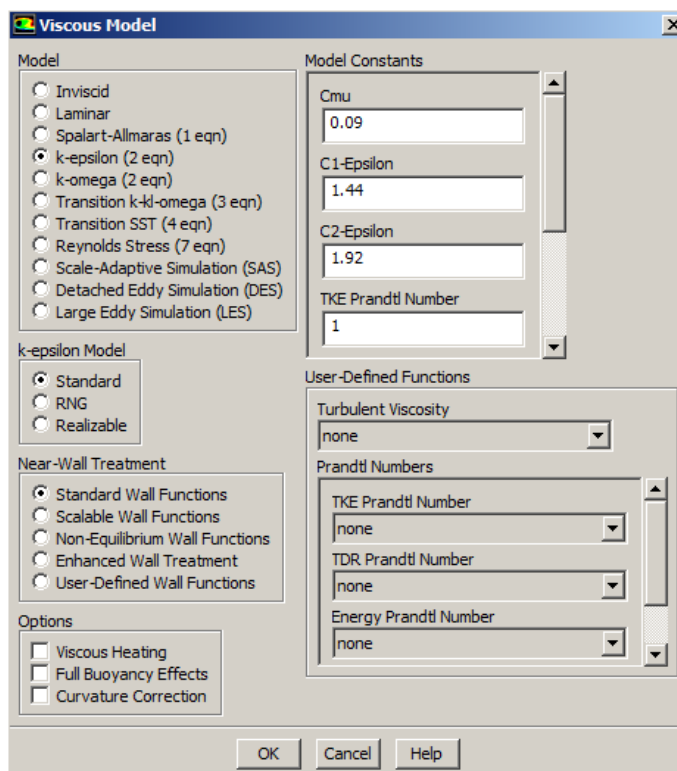
Obr 4.13 Nastavení gravitace

4.4.2 Nastavení záložky Models

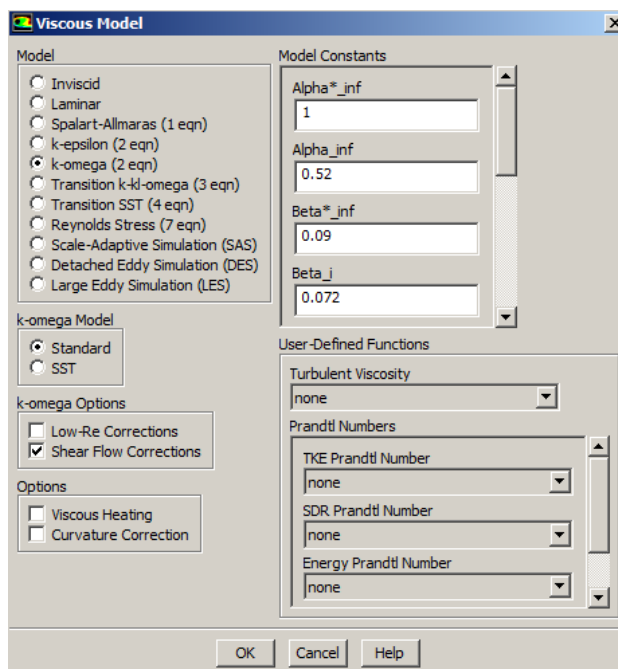
Další nastavení se provádí v záložce MODELS, kde je důležité nastavit ENERGY (energii), jelikož tato funkce nám umožňuje modelovat prostup tepla mezi pevnou (SOLID) a kapalnou (FLUID) látkou viz Obr 4.14. V další záložce VISCOUS se volí matematický model proudění. Matematický model byl zvolen Standard k- ϵ a StandardWall Fn pro porovnání lze zvolit jiný typ matematického modelu například „Standard k-omega“ viz obr. 4.15 a 4.16



Obr. 4.14 Nastavení energie pro proudění tepla



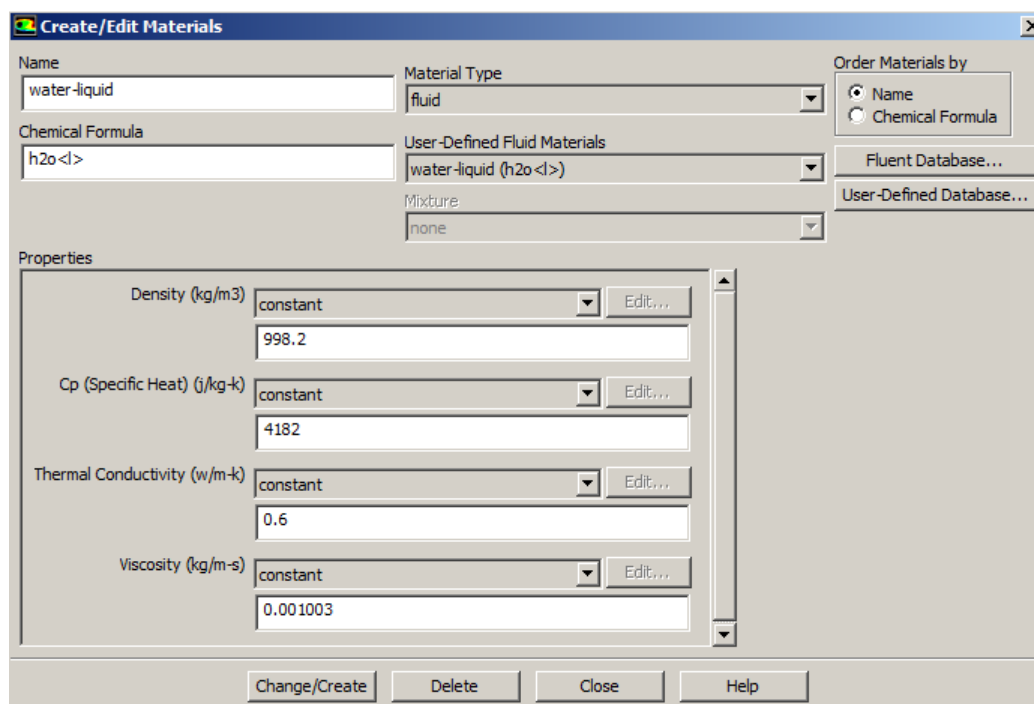
Obr 4.15 Model funkce Standard k-e a StandardWall Fn



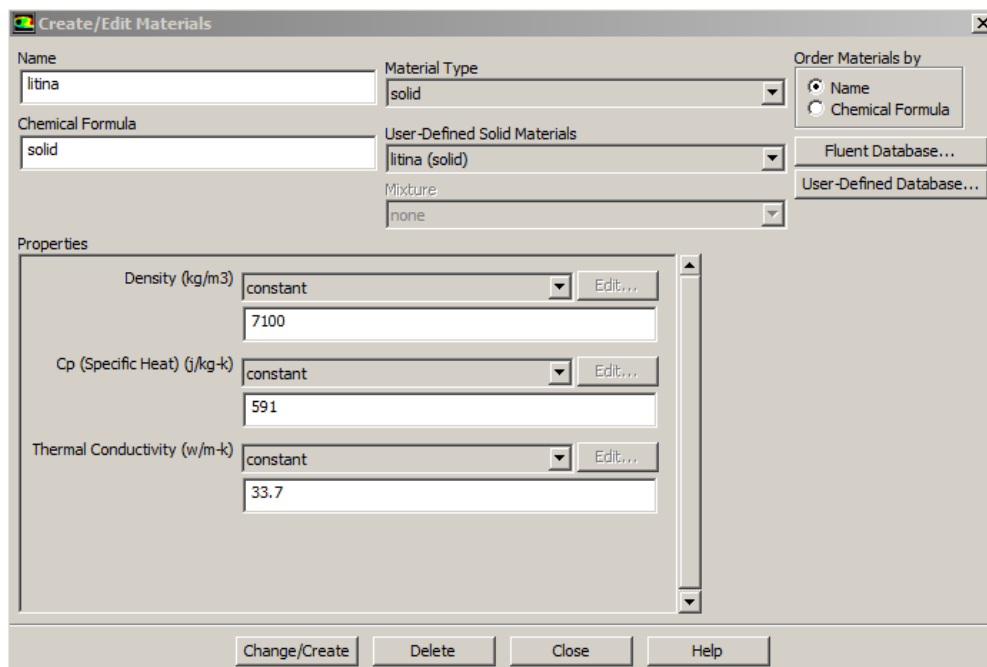
Obr 4.16 Model funkce Standard k-omega

4.4.3 Nastavení záložky Materials

V této záložce se nastavují materiály pro pevnou (SOLID) látku a kapalnou nebo plynou (FLUID) látku. Dle zadání byla jako pevná látka volena litina typu „EN GJL-150“ a kapalná látka voda (WATER – LIQUID). Aplikace FLUENT disponuje knihovnou materiálů, ze kterých je možno zvolit již předdefinovaný materiál viz obr 4.17. Pokud potřebný materiál neobsahuje, je možno si jej nastavit ručně viz obr 4.18.



Obr 4.17 Fluid materiál water – liquid

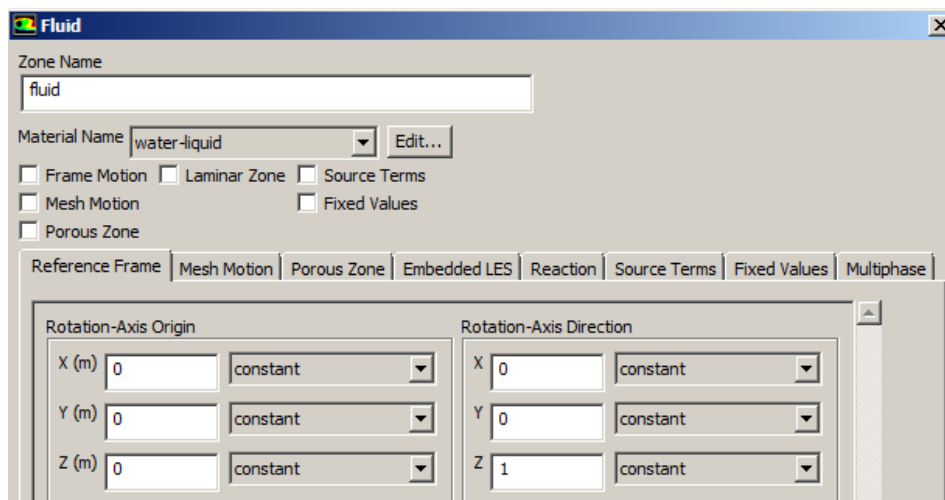


Obr 4.18 Vytvořený materiál (litina)

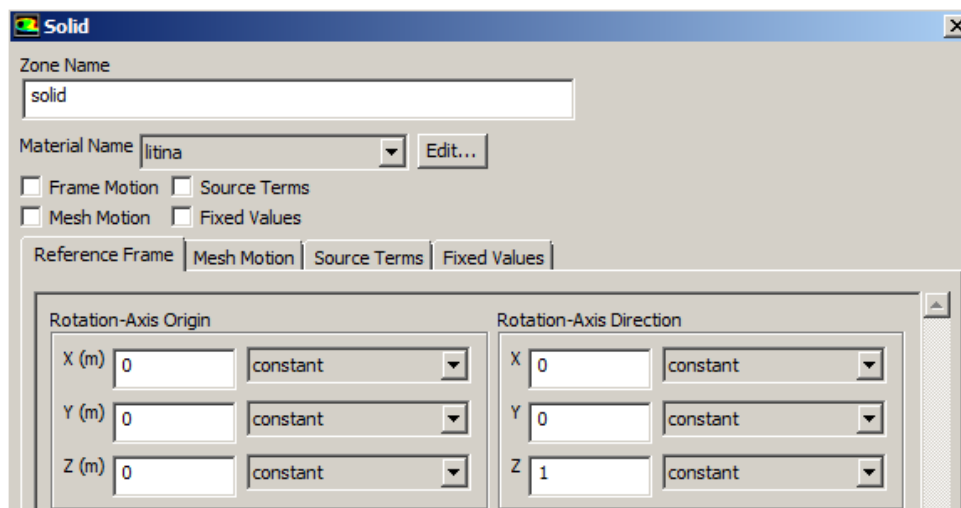
Každý materiál je specifikován různými fyzikálními veličinami. Tyto veličiny jsou přednastaveny jako konstantní, lze je však různě upravovat. V rámci diplomové práce je pro modelování použito obou těchto případů. V jednom z případů jsou hodnoty tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity nastaveny na konstantní hodnotu, v druhé se mění v závislosti na teplotě viz grafy 1,2 uváděné v kapitole 3.1.

4.4.4 Nastavení záložky Cell ZoneConditions

Tato záložka slouží k přiřazení nově zvolených materiálů k pevné a kapalně oblasti.



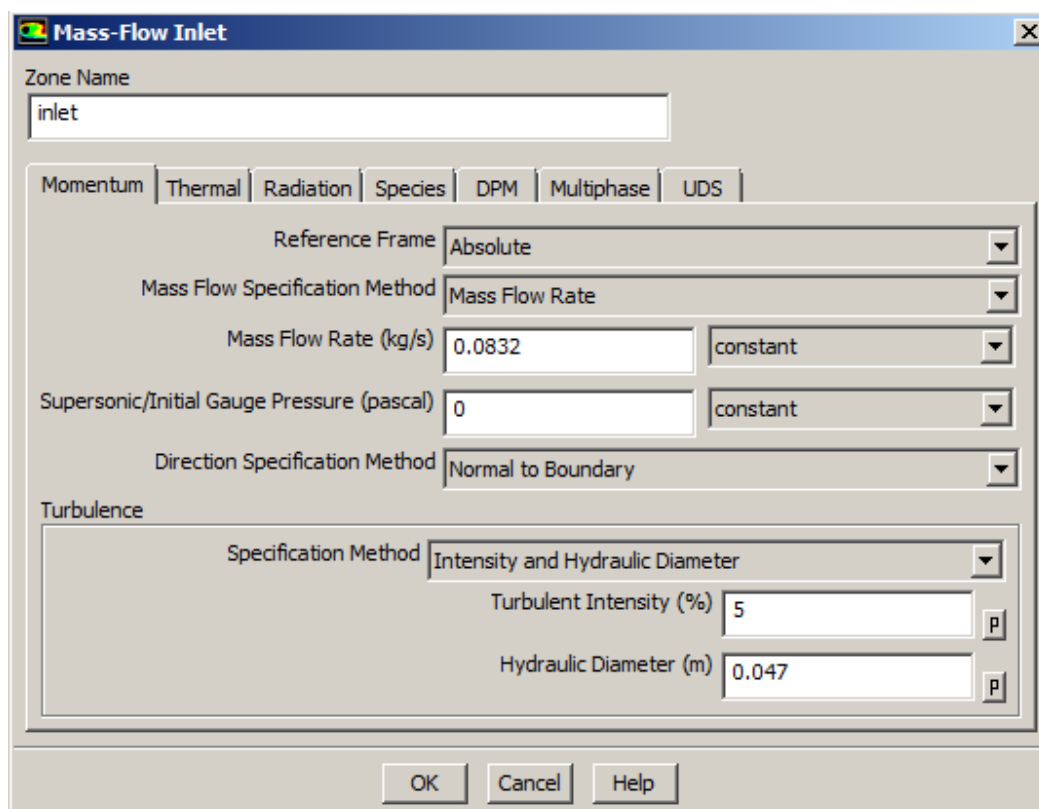
Obr 4.20 Přiřazení vody k oblasti fluid



Obr 4.21 Přiřazení litiny k oblasti solid

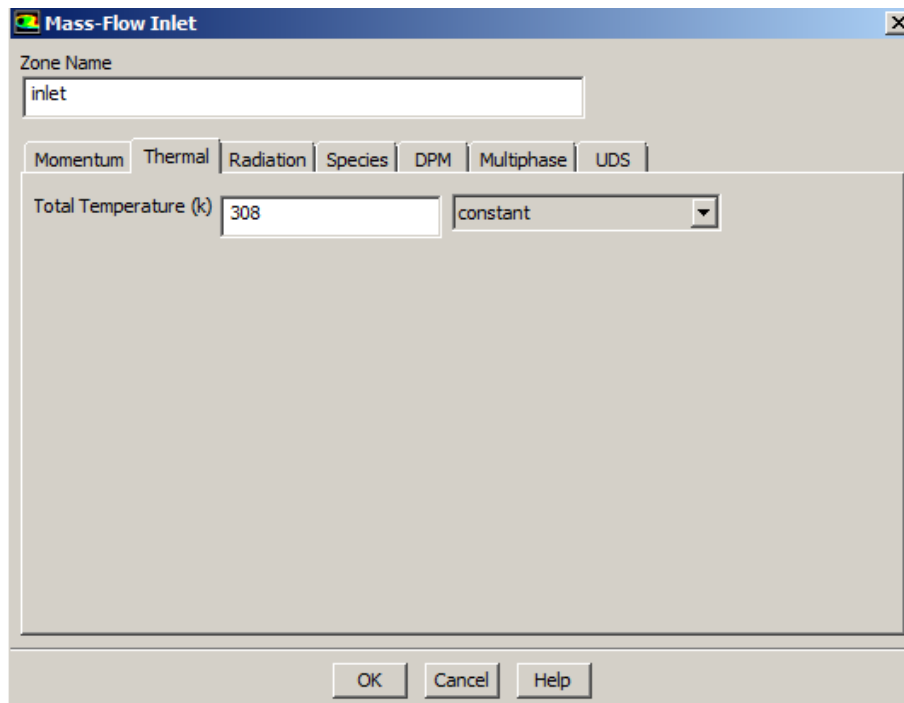
4.4.5 Nastavení záložky BoundaryConditions

Slouží k nastavení okrajových podmínek na vstupu (INLET), výstupu (OUTLET) a na stěnách, kde nás zajímá průstup tepla (WALL). Všechny tyto definované oblasti byly vytvořeny v aplikaci MESH a jsou pojmenovány pomocí NAMED SELECTION.

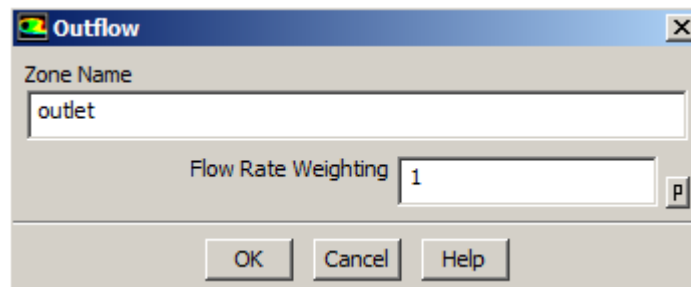


Obr 4.22 Nastavení hmotnostního průtoku na vstupu

Na vstupu je třeba zadat hodnotu hmotnostního průtoku Q_m , který je uveden v zadání.

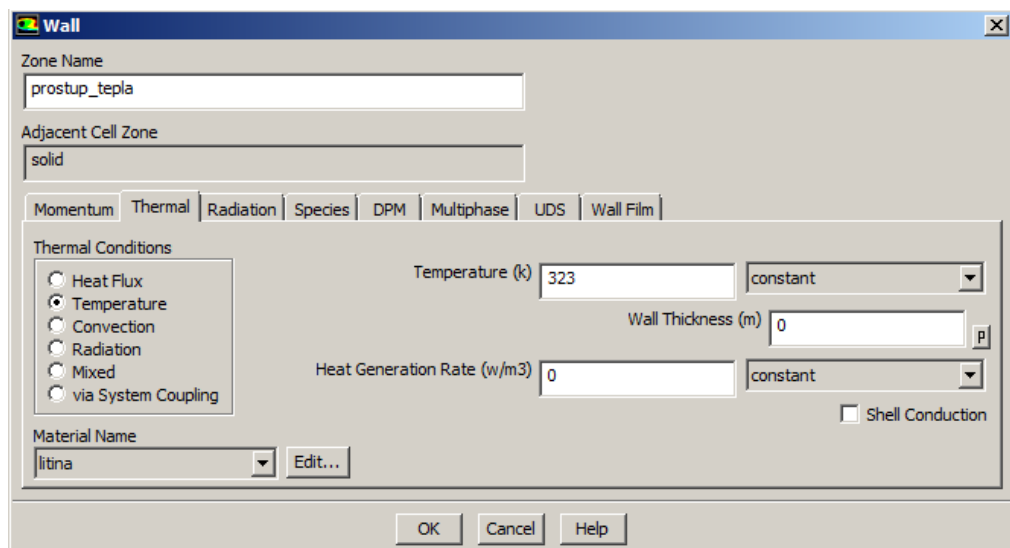


Obr 4.23 Nastavení teploty na vstupu

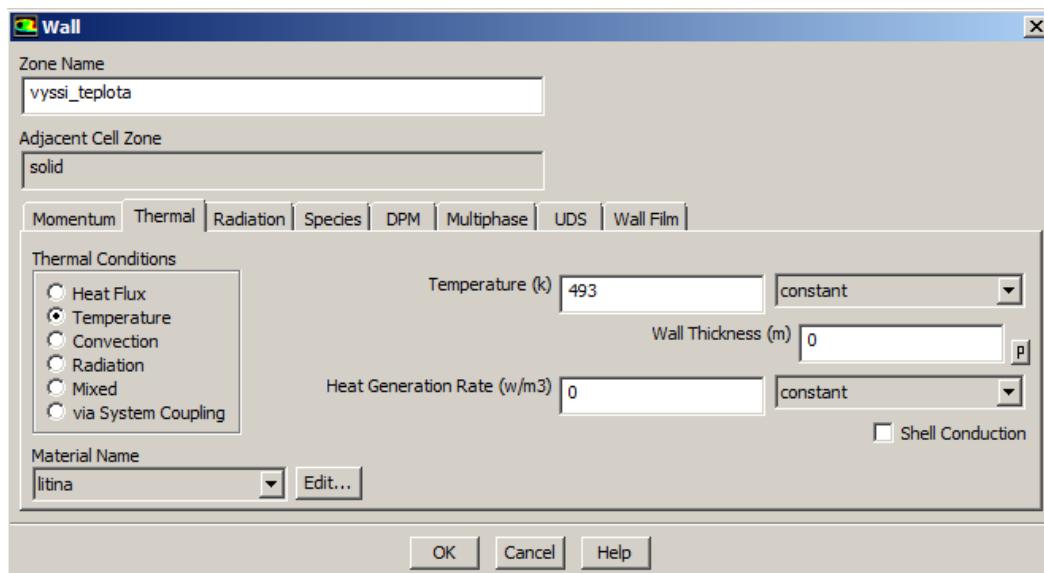


Obr 4.23 Nastavení výstupních okrajových podmínek

Okrajová podmínka na výstupu je definována jako OUTFLOW



Obr 4.24 Nastavení okrajových podmínek na stěně s nižší teplotou

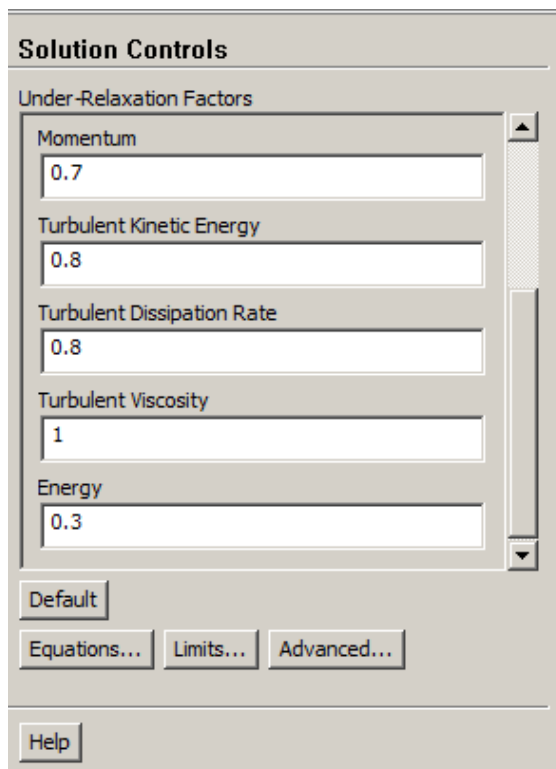


Obr 4.25 Nastavení okrajových podmínek na stěně s vyšší teplotou

Okrajové podmínky na stěnách se liší pouze velikostí teplot působící na danou stěnu.

4.4.6 Nastavení záložky Solution Controls

V této záložce je možno upravit Relaxační parametry. Během výpočtu lze tyto parametry měnit v závislosti na daném průběhu výpočtových iterací.



Obr 4.26 Úprava hodnoty energie

4.4.7 Nastavení záložky SolutionInitialization

The screenshot shows the 'Solution Initialization' dialog box. Under 'Initialization Methods', 'Standard Initialization' is selected. 'Compute from' is set to 'inlet'. Under 'Reference Frame', 'Relative to Cell Zone' is selected. The 'Initial Values' section contains the following fields: Gauge Pressure (pascal) with value 0, X Velocity (m/s) with value 0, Y Velocity (m/s) with value 0, Z Velocity (m/s) with value 0.02354832, Turbulent Kinetic Energy (m2/s2) with value 2.079463e-06, and Turbulent Dissipation Rate (m2/s3) with value 1.279818e-07. At the bottom are buttons for 'Initialize', 'Reset', 'Patch...', 'Reset DPM Sources', 'Reset Statistics', and 'Help'.

Obr 4.27 Nastavení inicializace

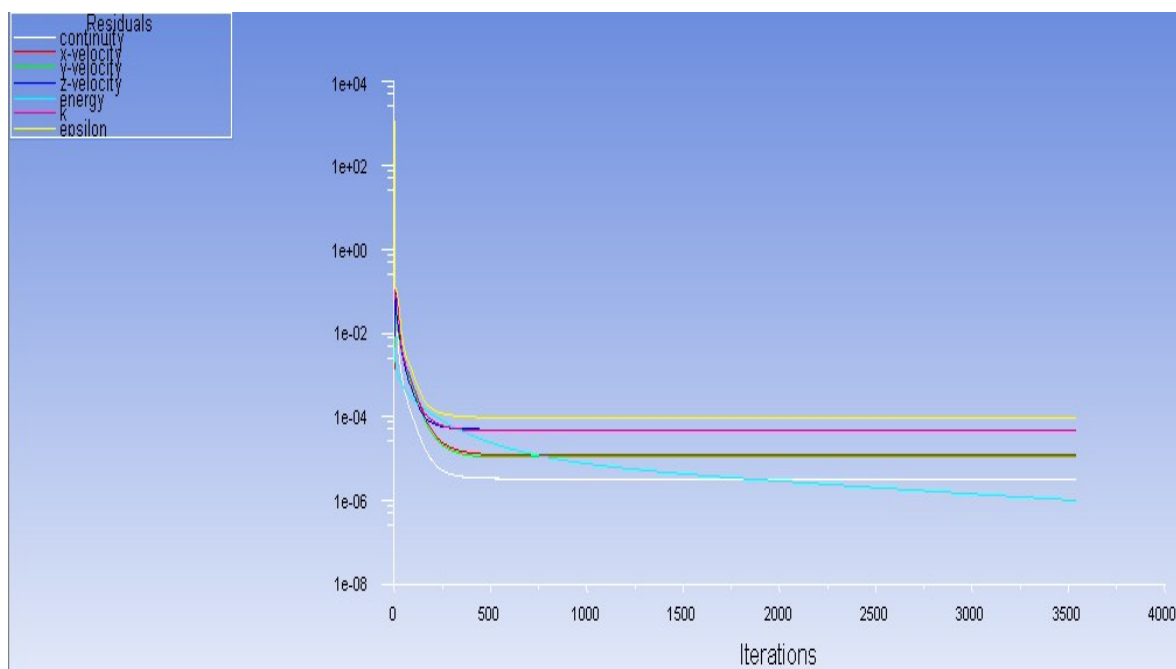
Tato záložka slouží k inicializaci vstupních parametrů před začátkem výpočtu. Je třeba zpětně zkontrolovat, jestli dané veličiny odpovídají zadání.

4.4.8 Nastavení záložky Run calculation

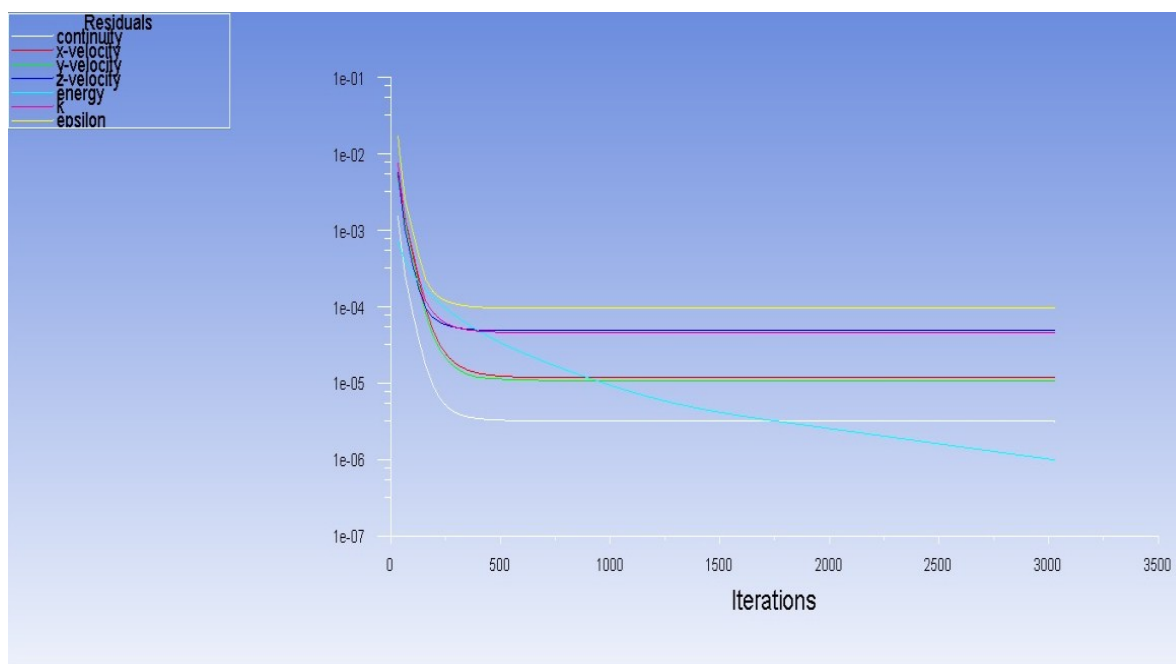
The screenshot shows the 'Run Calculation' dialog box. It features buttons for 'Check Case...', 'Preview Mesh Motion...', 'Data File Quantities...', and 'Acoustic Signals...'. The 'Number of Iterations' is set to 4000 and the 'Reporting Interval' is set to 1. The 'Profile Update Interval' is also set to 1. A 'Calculate' button is at the bottom.

Obr. 4.28 Nastavení počtu iterací při výpočtu

Při výsledném počítání je důležité získat konvergentní řešení. Míru konvergence určují residuály. Tyto residuály nám určují maximum rozdílu dvou odpovídajících si veličin. Tyto veličiny jsou počítány vždy ve stejném místě sítě ve dvou po sobě navazujících iteracích. Dokončení výpočtu dosáhneme po dosažení nastaveného počtu iterací, nebo po dosažení všech hodnot residuálů pod 10^{-4} , krom hodnoty energie ta musí dosahovat hodnoty 10^{-6} .



Obr 4.29 Výsledek iterací pro nekondantní teplotu



Obr 4.30 Výsledek iterací pro konstantní teplotu

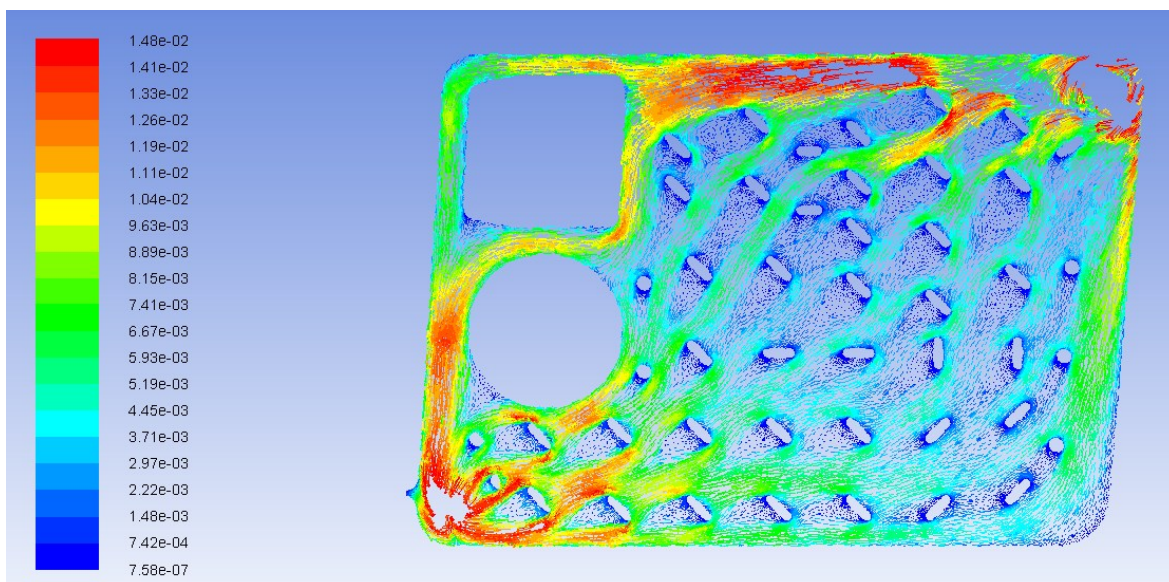
5. Vyhodnocení výsledků

Výsledky jsou vyhodnocovány pro objemový průtok $Q_v = 5 \text{ [dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$. Tato hodnota byla poskytnuta zadavatelem. Výpočet je prováděn při dvou různých teplotách na vstupu. První teplota má hodnotu 308[K] a odpovídá teplotě vody za chodu kotle. Druhá teplota má hodnotu 293[K], tato teplota simuluje vstupní teplotu při zapnutí kotle. Výpočty jsou prováděny pro konstantní a nekonstantní fyzikální vlastnosti v závislosti na teplotě.

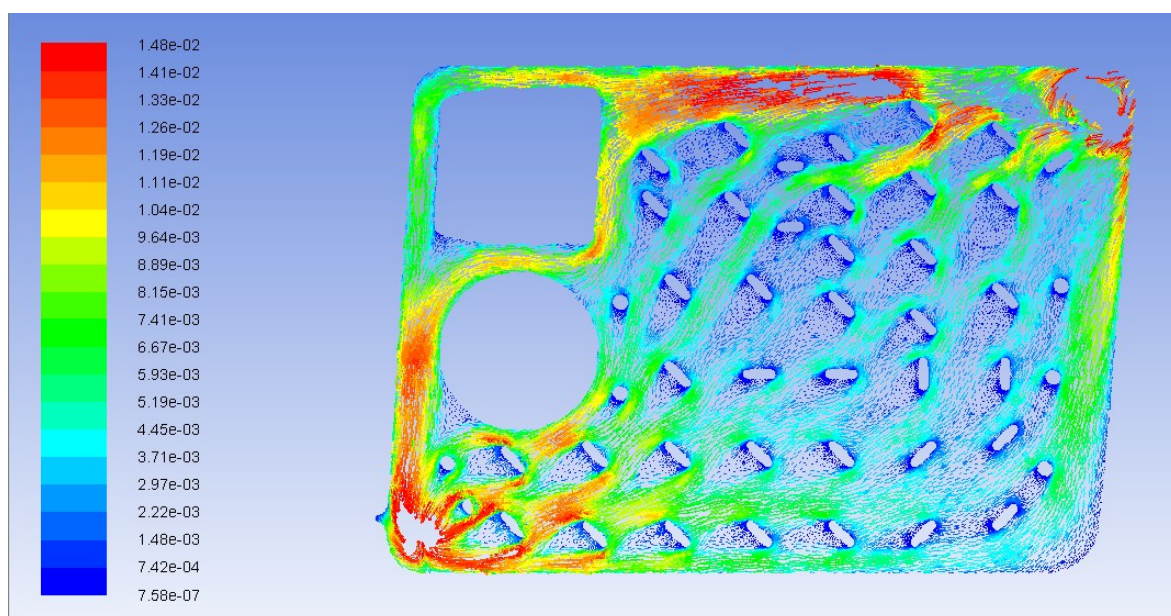
5.1 Grafické výsledky pro objemový průtok $Q_v = 5 \text{ [dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$

Rychlostní pole proudění vody článkem kotle.

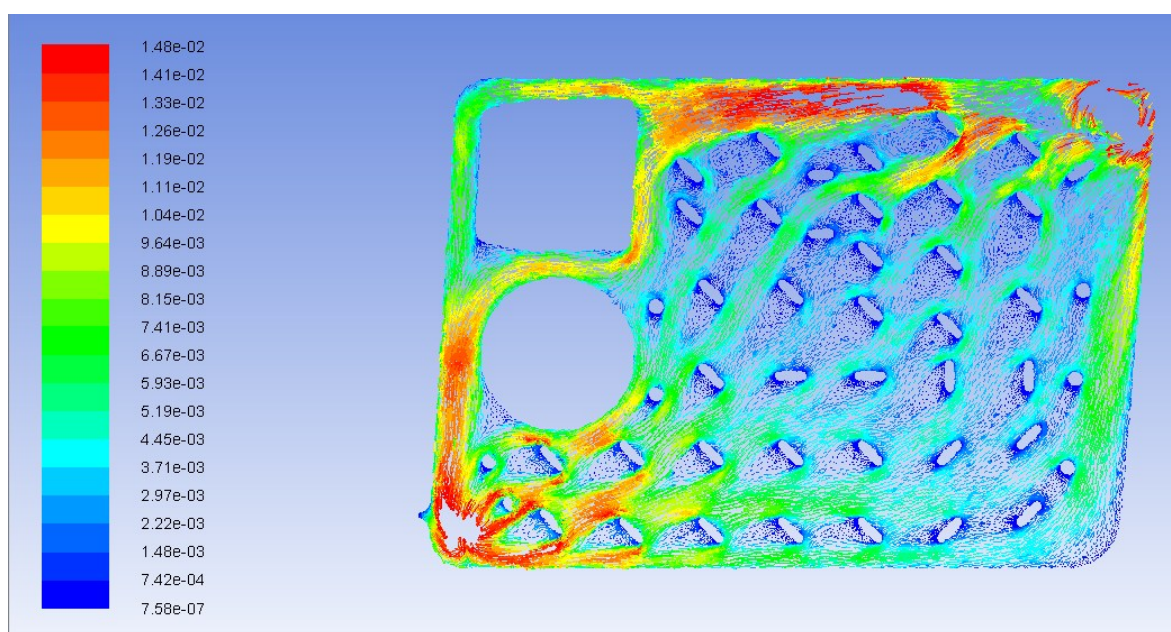
Výsledky rychlostního proudění vody určují správné rozložení geometrie zadaného článku. Rychlostní pole je optimálně navrženo viz Obr 5.1, kde je patrné, že voda proudí celým objemem dané geometrie. Stupnice u obrázků znázorňuje hodnoty rychlostí v $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$



Obr. 5.1 Znáznornění rychlostního proudění vody nekonstantních fyzikálních vlastností měnících se v závislosti na teplotě při 308 [K]



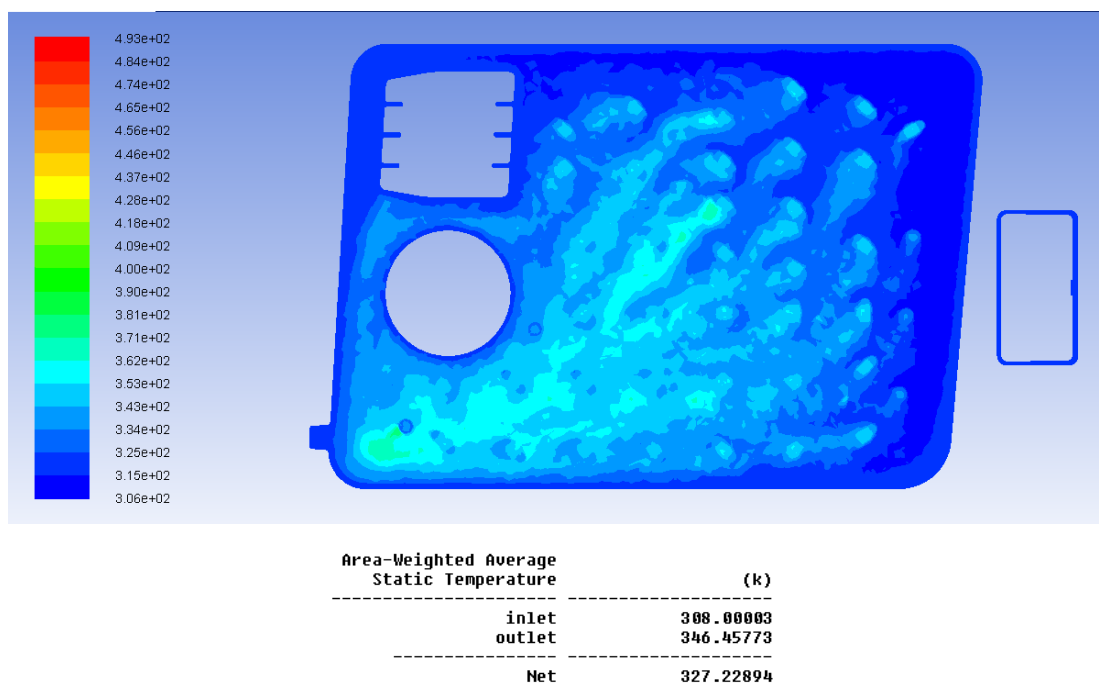
Obr. 5.2 Znáznornění rychlostního proudění vody nekonstantních fyzikálních vlastností měnících se v závislosti na teplotě při 297 [K]



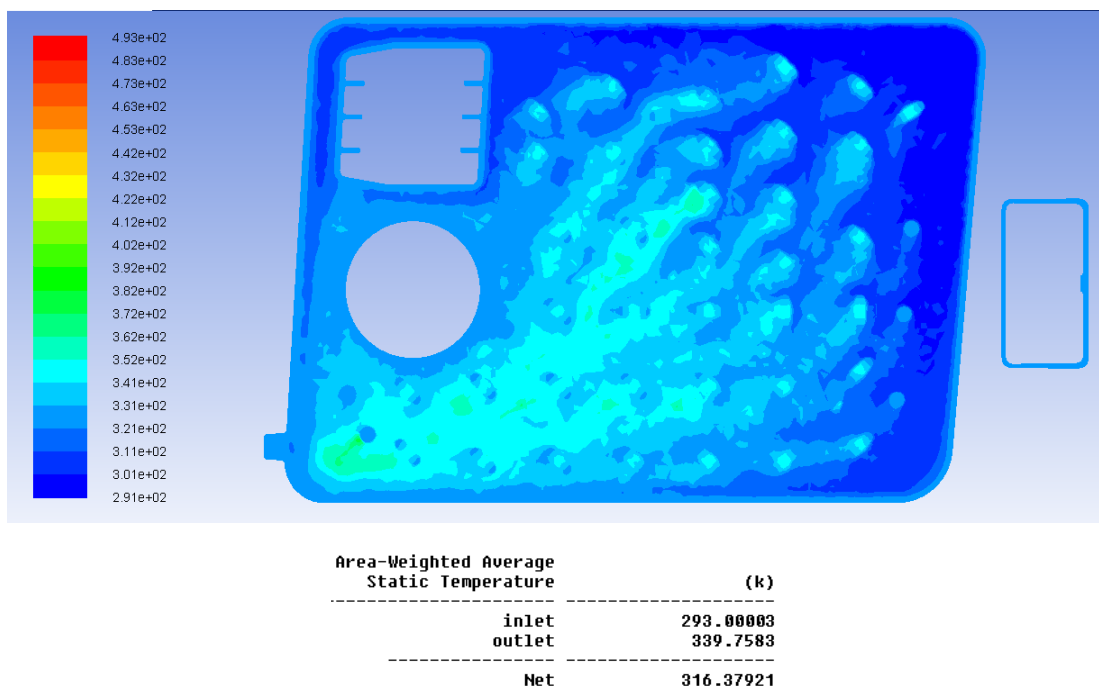
Obr. 5.3 Znáznornění rychlostního pole pro konstantní fyzikální vlastnosti při teplotě 308 [K]

Teplotní pole proudění vody článkem kotle.

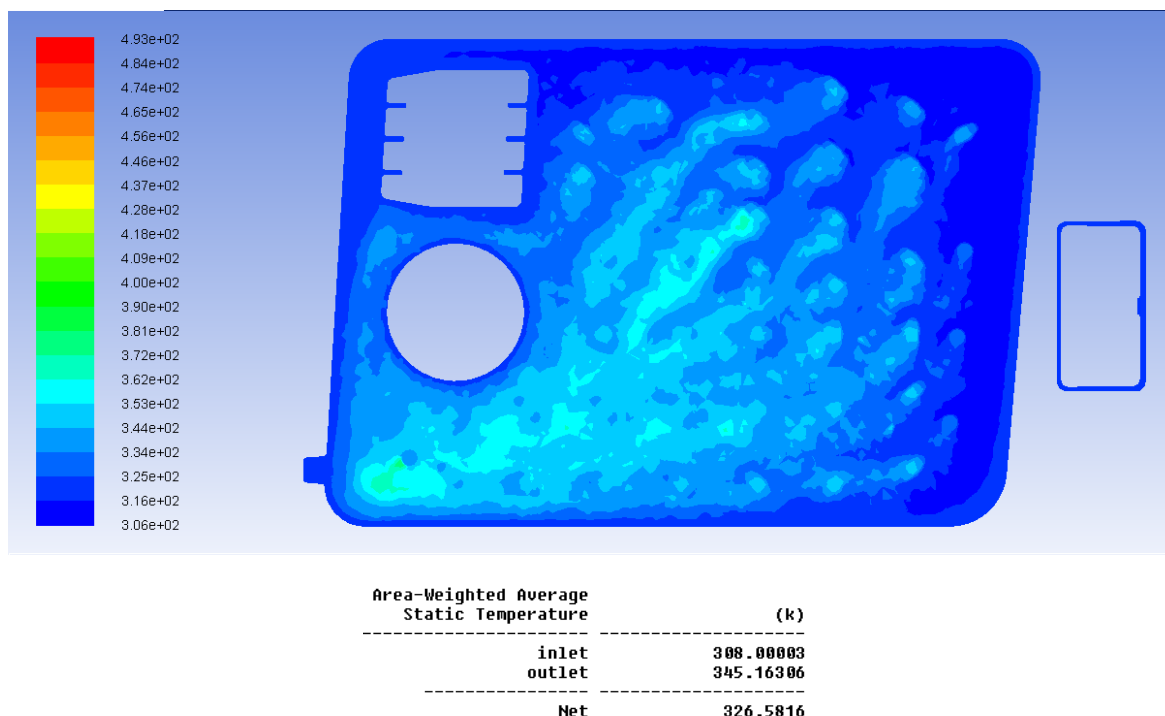
Průchod vody článkem pro konstantní a proměnlivé fyzikální vlastnosti závislé na teplotě. Teplota vody se zvyšuje, od vstupní části k části výstupní viz Obr 5.4, Stupnice u obrázků znázorňuje vypočtené hodnoty teploty udávané v [K]



Obr. 5.4 Výsledek změny teploty kapaliny při průchodu článkem při nekonstantních fyzikálních hodnotách při teplotě 308 [K]



Obr. 5.5 Výsledek změny teploty kapaliny při průchodu článkem při nekonstantních fyzikálních hodnotách při teplotě 298 [K]



Obr. 5.6 Výsledek změny teploty kapaliny při průchodu článkem při konstantních fyzikálních hodnotách při teplotě 308 [K]

Rychlostní a teplotní pole pro 297 [K] je udáno pouze pro nekonstantní fyzikální vlastnosti, jelikož je při změně těchto vlastností téměř totožné s konstantním zadáním.

Zhodnocení modelovaných výsledků pro všechny varianty průtoků.

Závěrem modelování je přiložena tabulka pro porovnání dosažených hodnot teploty na výstupu z článku kotle v závislosti na velikosti objemového průtoku. Zároveň je proveden výkonnostní výpočet pro daný model článku viz rovnice (5.1).

Tab.2 výsledky modelování

Objemový průtok	Hmotnostní průtok	Teplota na vstupu	Teplota na vstupu	Teplota na výstupu	Teplota na výstupu	Výkon kotle
Q_v	Q_m	t_1	T_1	t_2	T_2	P
$[dm^3 \cdot min^{-1}]$	$[kg \cdot s^{-1}]$	$[^{\circ}C]$	$[K]$	$[^{\circ}C]$	$[K]$	$[kW]$
5	0,083166667	35	308	73,45	346,45	13,39
5	0,083166667	20	293	66,75	339,75	16,28

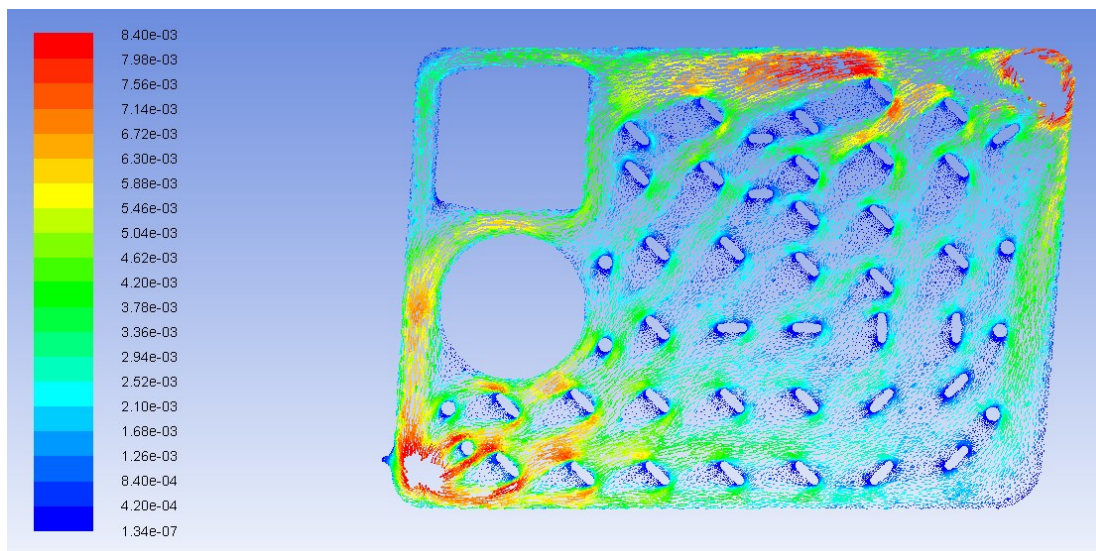
$$P = Q_m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (5.1)$$

c_p - je měrná tepelná kapacita vody a má hodnotu 4,187 kJ/kgK

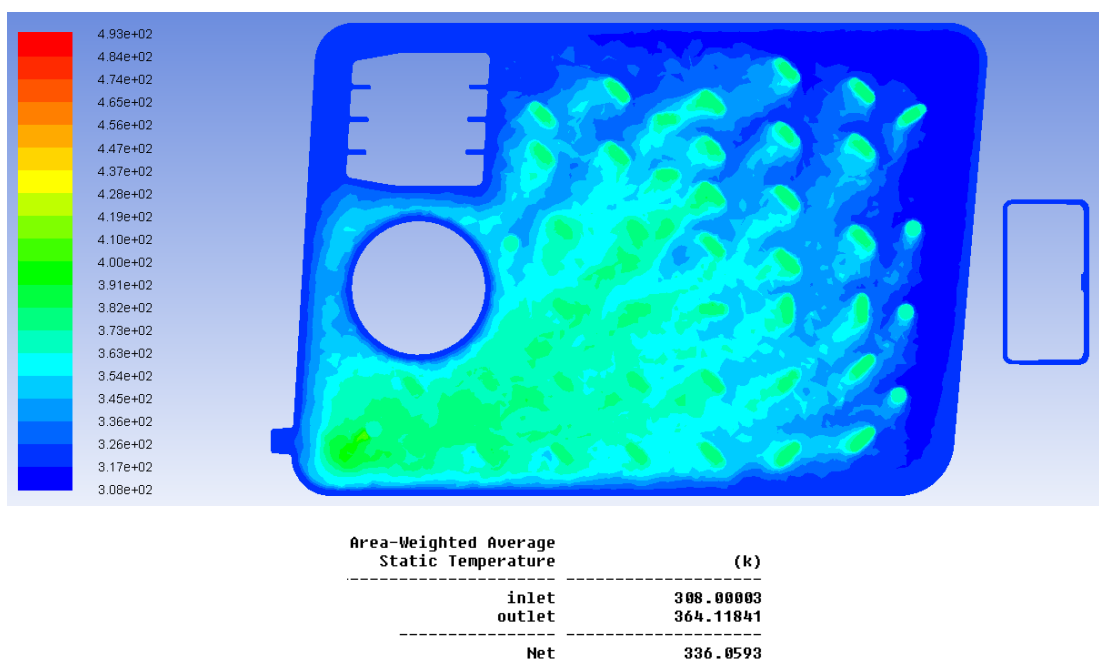
5.2 Objemové průtoky $Q_V = 2,5$ a $Q_V = 10$ [$dm^3 \cdot min^{-1}$]

Pro porovnání byly vyhodnoceny simulace také pro poloviční a dvojnásobný objemový průtok. Na obr. 5.7 a 5.8 můžeme vidět rychlostní a teplotní pole při objemovém průtoku $2,5$ [$dm^3 \cdot min^{-1}$] a na obr. 5.9 a 5.10 jsou vyhodnoceny tyto pole pro objemový průtok 10 [$dm^3 \cdot min^{-1}$].

5.2.3 Výsledky pro objemový průtok $Q_V = 2,5$ [$dm^3 \cdot min^{-1}$]

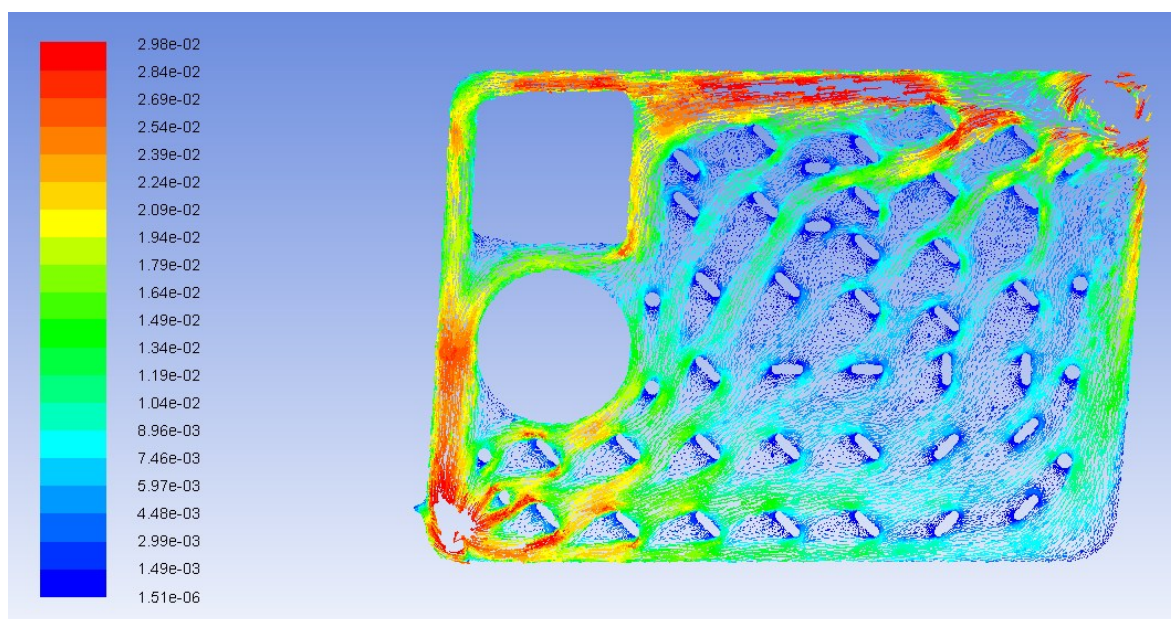


Obr. 5.7 Znáznornění rychlostního proudění vody nekonstantních fyzikálních vlastností měnících se v závislosti na teplotě při objemovém průtoku $Q_V = 2,5$ [$dm^3 \cdot min^{-1}$]

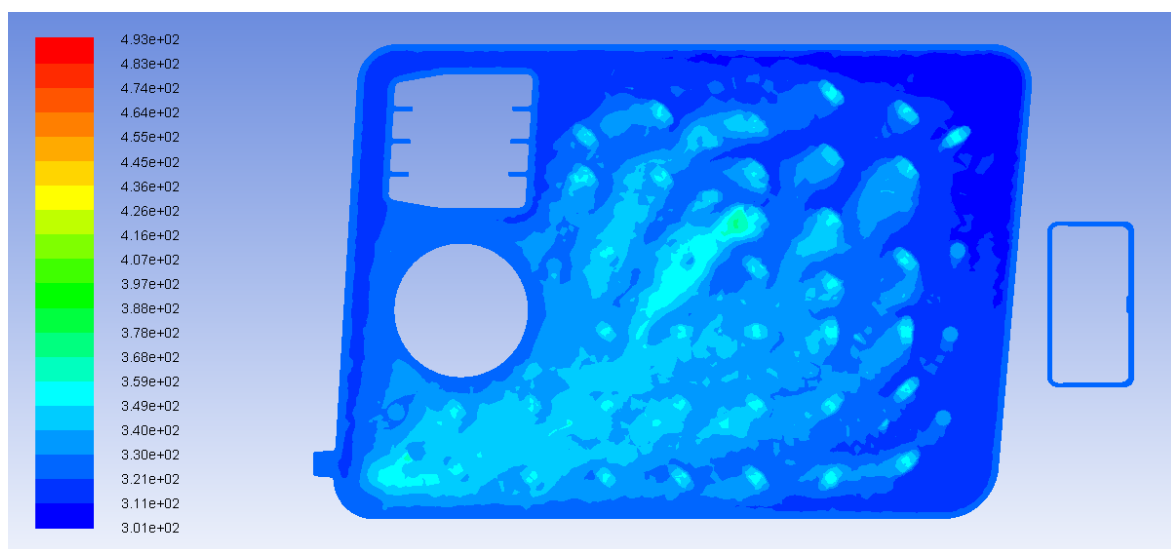


Obr. 5.8 Výsledek změny teploty kapaliny při průchodu článkem při objemovém průtoku $Q_V = 2,5$ [$dm^3 \cdot min^{-1}$]

5.2.1 Výsledky pro objemový průtok $Q_V = 10 \text{ [dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$



Obr. 5.9 Znáznornění rychlostního proudění vody nekonzstantních fyzikálních vlastností měnících se v závislosti na teplotě při $Q_V = 10 \text{ [dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$



Area-Weighted Average Static Temperature	(K)
inlet	308.00003
outlet	334.26163
Net	321.13086

Obr. 5.10 Výsledek změny teploty kapaliny při průchodu článkem při objemovém průtoku $Q_V = 10 \text{ [dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$

Shrnutí výstupních teplot pro všechny simulace objemových průtoků je uvedeno v tab.3

Tab.3 Shrnutí teplotních výsledků na výstupu z článku kotle

Objemový průtok	Hmotnostní průtok	Teplota na vstupu	Teplota na vstupu	Teplota na výstupu	Teplota na výstupu
Q_v	Q_m	t_1	T_1	t_2	T_2
$[dm^3 \cdot min^{-1}]$	$[kg \cdot s^{-1}]$	$[^{\circ}C]$	$[K]$	$[^{\circ}C]$	$[K]$
5	0,083166667	35	308	73,45	346,45
2,5	0,041583333	35	308	91,12	364,12
10	0,166333333	35	308	61,26	334,26

6. Závěr

Cílem diplomové práce byla 3D simulace proudění vody s přestupem tepla daného článku kotle. Podle vyhodnocení rychlostního a teplotního pole je posuzována správnost rozložení geometrie článku. Geometrie byla dodána zadavatelem, který se zabývá návrhem a výrobou kotlů. Zadavatel požadoval vypracování simulace proudění vody v článku kotle v CFD systému a případnou optimalizaci článku v závislosti na zpracovaných výsledcích.

První část diplomové práce je věnována popisu turbulentního a laminárního proudění, základním matematickým modelům a popsání prostupu tepla, kde lze nalézt výpočtové vztahy pro řešený matematický model k- ϵ standard, model k- ω , teplotní gradient a prostup tepla rovinnou stěnou.

V následující části je popsán typ litiny, ze které byl řešený článek kotle zhotoven. Jsou zde uvedeny jeho základní parametry a tepelné vlastnosti. Dále jsou zde popsány okrajové podmínky nutné k řešení daného problému. Tyto okrajové podmínky byly rovněž dodány zadavatelem.

Pro řešení rychlostního a teplotního pole byl využit software AnsysFluent. Tento software se řadí mezi CFD systémy. Byla zde navržena a vytvořena síť na daném modelu článku. Vygenerovaná síť obsahuje 2 443 839 elementů. Na článku kotle jsou označeny plochy, na které byly nastaveny okrajové podmínky. Mezi tyto podmínky patří hmotnostní průtok, vstupující teplota vody a teploty na stěnách. Do softwaru byly zadány vlastnosti litiny (měrná tepelná energie, tepelná vodivost a hustota v závislosti na teplotě). V diplomové práci je také popsáno nastavení softwaru pro daný výpočet.

Objemový průtok vody byl zadán $5 [dm^3 \cdot min^{-1}]$, teplota na vstupu $35 [^{\circ}C]$ a teplota na stěně článku $220 [^{\circ}C]$. Předpokládaná teplota vody na výstupu z článku je $70 [^{\circ}C]$. Pro tyto hodnoty byl proveden výpočet, u kterého bylo také porovnáváno jak se bude lišit, zadáme-li na okrajovou podmínku stěny konstantní fyzikální vlastnosti (měrná tepelná energie, tepelná vodivost) nebo tyto vlastnosti zadáme jako proměnné v závislosti na teplotě viz tab.1. Z výpočtu je patrné, že závislosti na teplotě uvedených vlastností nemají velký vliv, tudíž se mohou zanedbat. Dále byla nastavena okrajová podmínka teploty na vstupu $20 [^{\circ}C]$, která simuluje teplotu vody před začátkem topení. Je zde uveden výpočet výkonu daného článku pro obě tyto varianty. Z výsledného rychlostního pole vyplývá, že daná geometrie je navržena správně, jelikož kapalina v článku proudí rovnoměrně po celém objemu a nebylo nutno tuto geometrii nijak optimalizovat. Provedeným výpočtem pro vstupní hodnotu teploty $35 [^{\circ}C]$ je dosaženo teploty na výstupu $73,45 [^{\circ}C]$ což odpovídá předpokládané teplotě.

V poslední části diplomové práce byly provedeny výpočty pro poloviční a dvojnásobný průtok vody zadaným článkem. Těmito výpočty bylo ověřeno, že postupným navyšováním objemového průtoku klesá teplota na výstupu. Rozdíly teplot mezi průtoky činily rozdíl přibližně 30 [°C] z uvedených simulací prostupu tepla. Přínos této práce je, že zadavatel touto metodou ušetří značné prostředky při výrobě prototypu článku kotle a jeho následného zkoušení.

Poděkování

Na závěr této diplomové práce bych chtěl poděkovat mému vedoucímu panu doc. Dr. Ing. Lumírovi Hružíkovi a konzultantovi panu Ing. Adamovi Burečkovi za podporu a odbornou pomoc při vypracovávání mé diplomové práce.

Seznam použité literatury

- [1] MAMICA, M. *Modelování proudění v článku kotle*. Diplomová práce. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011.
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Lamin%C3%A1rn%C3%AD_proud%C4%9Bn%C3%AD>
- [2] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin – Fluent. CFX*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008, 142 s.,
<<http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>>
- [3] KRATOCHVÍL *Sdílení tepla*. SPŠ2011
<http://www.sps-ko.cz/documents/MEC_kratochvil/TERMOMECHANIKA_INTERNET_DOC/16_Sdileni_tepla.pdf>
- [4] WALD, F. *Vedení tepla – kondukce* ČVUT 2009
<http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-2_Vedeni_tepla.pdf>
- [5] WIKIPEDIE *Laminární proudění*. Otevřená encyklopedie
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Lamin%C3%A1rn%C3%AD_proud%C4%9Bn%C3%AD>
- [6] WIKIPEDIE *Turbulentní proudění*. Otevřená encyklopedie
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Turbulentn%C3%AD_proud%C4%9Bn%C3%AD>
- [7] ÚSTAV CHEMICKÉHO INŽENÝRSVÍ VŠCHT Praha
<<http://www.vscht.cz/uchi/ped/bc05/03.tok.trubkou.pdf>>
- [8] KOZUBKOVÁ, M., BLEJCHAŘ, T., BOJKO, M. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, 173 s., ISBN 978-80-248-2491-8
- [9] INCROPERA, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. edition. John Wiley and Sons, 2007, 996 p. ISBN 978-0-471-45728-2.
- [10] BLEJCHAŘ, T. *Turbulence-Modelování proudění – CFX*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010, 263s <http://www.338.vsb.cz/PDF/Turbulence_ESF_v4.pdf>
- [11] POBRÁBSKÝ, T., POSPÍŠILOVÁ, S. *Struktura a vlastnosti grafitických litin* VUT Brno Fakulta strojního inženýrství (Ústav materiálových věd a inženýrství)
<<http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/savgl/index.php?chapter=10>>

- [12] DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 257 s.
- [13] *ANSYS CFX*. Ansys Inc. CFX 13.0, Release 13.0: Dokumentace k programu
- [14] BOJKO, M. *3D Proudění – ANSYS Fluent*, e-learningová skriptu, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010 226 s.
- [15] HRDLIČKA, F. *Vyhláška č. 276/2007 - účinnost kotlů*, Praha 2007
<<http://www.tzb-info.cz/4640-vyhlaska-c-276-2007-ucinnost-kotlu>>
- [16] FORT, J., KOZEL, K., FÜRST, J., HALAMA, J., DOBEŠ, J. *Numerická simulace proudění I*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství CVUT, 2005. 100 s. ISBN 80-01-03162-4.
- [17] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. 3. vyd. Praha: Nakladatelství CVUT, 2007. 212 s. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [18] INCROPERA, F. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6. edition. John Wiley and Sons, 2007, 996 p. ISBN 978-0-471-45728-2.
- [19] JÍCHA, M. *Počítačové modelování úloh vedení tepla a proudění*. 1. vydání. Brno: Nakladatelství Vysokého učení technického, 1991. 121 s. ISBN 80-214-0364-0.
- [20] TECHSOFT Engineering *Dynamika tekutin (CFD)*
<<http://www.techsoft-eng.cz/produkty/ansys-simulacni-technologie/dynamika-tekutin-cfd/>>
- [21] PAVELEK, M. *Základy přenosu tepla*, FSI VUT Brno
<http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/termo/15_Prenos.pdf>